

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# ANALÝZA PROUDOVÝCH POMĚRŮ V OKOLÍ NOVÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

HYDRAULIC ANALYSIS IN THE SURROUNDING OF HYDRO POWER PLANT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

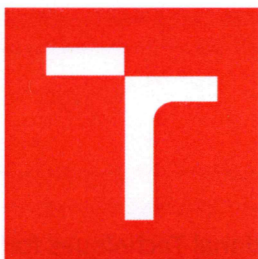
Bc. Václav Lorenc

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID DUCHAN, Ph.D.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Václav Lorenc
<b>Název</b>	Analýza proudových poměrů v okolí nové vodní elektrárny
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. David Duchan, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Podklady:

-Příčné profily

-DMT

-Stavební výkresy objektů

Literatura:

FLETCHER, Clive A. J: Computational Techniques for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, 1991. ISBN 0172-5726. (EN)

HAVLÍK, V., INGEDULD, P., VANĚČEK, S., ZEMAN, E.: Matematické modelování neustáleného proudění. ČVUT Praha, 1992. (CS)

ŘÍHA, Jaromír et al.: Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. PC-DIR Brno, 1997. ISBN 80-214-0827-8. (CS)

CHUNG, T.J.: Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002. ISBN 0 521 59416 2. (EN)

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V okolí navrhované vodní elektrárny proveďte ověření proudových poměrů. Na základě analýzy ověřte vhodnost geometrie nátoků s přihlédnutím ke stávající lodní dopravě.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

Ing. David Duchan, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou proudových poměrů u vodního díla Klecany – Roztoky, které se nachází ve Středočeském kraji na řece Vltavě v říčním kilometru 37,08. V této lokalitě bylo modelováno 3D proudění povrchové vody s cílem posouzení vlivu výstavby nové MVE Klecany II ke stávající MVE Klecany I. Na základě dostupných podkladů a dokumentace byly vytvořeny 3D modely stávajícího a plánovaného stavu, které byly jako podklad použity pro výpočet v programu FLOW 3D. V první části práce byl zkoumán vliv výstavby nové MVE Klecany II na stávající plavební činnost za stavu při průtoku  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Druhá část práce byla věnována posouzení tvaru nově navrženého nátoku na MVE Klecany II při průtoku  $Q_{90d}$ , který byl roven  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . V tomto stavu bylo posouzeno rozložení rychlostního pole na nově vybudovanou elektrárnu. Výsledky byly zpracovány do přehledných tabulek a obrázků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Klecany – Roztoky, malá vodní elektrárna, jez, plavební dráha, FLOW 3D, RANS, CFD,  $k-\varepsilon$  model

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with analysis of flow ratios at the hydraulic plant Klecany – Roztoky, located in the region of Střední Čechy at Vltava river (km 37,08). At this site 3D streaming of superficial water was simulated aiming to evaluate the influence of potencial construction of the new hydroelectric power plant Klecany II on existing Klecany I. Using all of the base documentation available, 3D models of current and planned conditions were created to serve as base for calculation in FLOW 3D. The first part of the thesis describes, how the planned construction of the new hydroelectric power plant Klecany II could influence the current fairway at the inlet  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . The second part analyses shape of planned flow hydroelectric power plant Klecany II for flow  $Q_{90d}$ , equal to  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . All of the results are presented in intelligible charts and images.

## KEYWORDS

Klecany – Roztoky, small hydroelectric power plant, weir, fairway, FLOW 3D, RANS, CFD,  $k-\varepsilon$  model

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Václav Lorenc *Analýza proudových poměrů v okolí nové vodní elektrárny*. Brno, 2017. 87 s.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.  
Vedoucí práce Ing. David Duchan, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2018

---

Bc. Václav Lorenc  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2018

---

Bc. Václav Lorenc  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce panu Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, ochotu a rady při vytvoření této práce.

Tato bakalářská práce byla zpracována na základě využití zapůjčených dat Povodím Vltavy, s. p. Zadavatelem práce byla projekční firma AQUATIS a.s. sídlící v Brně, které zároveň děkuji za poskytnuté veškeré podklady.



## Obsah:

1. Úvod.....	- 11 -
2. Cíle.....	- 12 -
3. Teorie.....	- 13 -
3.1. Matematické modelování .....	- 13 -
3.1.1. Metoda konečných diferencí (metoda sítí).....	- 14 -
3.1.2. Metoda konečných prvků .....	- 14 -
3.1.3. Metoda konečných objemů .....	- 15 -
3.2. Základní rovnice hydrodynamiky.....	- 15 -
3.2.1. Zákon zachování hmotnosti .....	- 15 -
3.2.2. Pohybová rovnice .....	- 17 -
3.2.3. Navier-Stokesova rovnice .....	- 18 -
3.3. Turbulentní proudění .....	- 19 -
3.4. Computational Fluid Dynamics.....	- 20 -
3.5. FLOW-3D.....	- 21 -
3.6. Volume of Fluid.....	- 21 -
4. Popis lokality .....	- 23 -
4.1. Vodní dílo Klecany-Roztoky.....	- 25 -
4.1.1. Charakteristika jezové zdrže .....	- 25 -
4.1.2. Charakteristika plavebního zařízení Roztoky .....	- 27 -
4.1.3. Charakteristika stávající MVE Klecany I.....	- 29 -
4.1.4. Charakteristika plánované MVE Klecany II.....	- 31 -
4.2. Hydrologická data.....	- 34 -
5. Tvorba 3D modelu .....	- 36 -
5.1. Model stávajícího stavu .....	- 36 -
5.1.1. Vytvoření modelu koryta toku .....	- 36 -
5.1.2. Tvorba modelu plavebního kanálu.....	- 38 -
5.1.3. Vytvoření nátoku na stávající MVE Klecany I.....	- 40 -
5.2. Model plánovaného stavu.....	- 41 -
6. Tvorba DMT modelu v programu HEC-RAS .....	- 43 -
7. Výpočet v programu HEC-RAS .....	- 46 -
7.1. Nastavení výpočtu .....	- 46 -
7.2. Výsledek výpočtu .....	- 47 -
8. Výpočet v programu FLOW-3D.....	- 50 -
8.1. Výpočet pro posouzení splavnosti.....	- 50 -

8.1.1.	Varianta stávajícího stavu .....	- 51 -
8.1.2.	Stav po výstavbě MVE Klecany II.....	- 55 -
8.2.	Výpočet pro posouzení tvaru nátoky na MVE Klecany II .....	- 56 -
9.	Zpracování výsledků .....	- 61 -
9.1.	Zpracování výsledků pro posouzení splavnosti.....	- 61 -
9.2.	Zpracování výsledků pro posouzení tvaru nátoky na MVE Klecany II .....	- 65 -
9.2.1.	Varianta stávajícího stavu .....	- 66 -
9.2.2.	Stav po výstavbě MVE Klecany II.....	- 70 -
10.	Závěr a zhodnocení .....	- 78 -
11.	Zdroje:.....	- 80 -
11.1.	Podklady .....	- 80 -
11.2.	Literatura .....	- 80 -
	Seznam tabulek: .....	- 82 -
	Seznam obrázků: .....	- 83 -
	Seznam použitých zkratk a symbolů:.....	- 86 -

## 1. Úvod

Foukající vítr, sluneční svit a tekoucí voda jsou na naší planetě nekonečně se opakujícími jevy skrývající neomezené množství energie. V dnešní době máme mnoho technologií, kterými jsme schopni tento energetický potenciál využívat natolik, že se stal každodenní běžnou záležitostí všech z nás, aniž bychom si to vůbec mnohdy uvědomovali.

Hodnota vyrobené elektřiny z obnovitelných zdrojů energie je přibližně desetinová z celkového množství vyprodukovaného v ČR. Naopak mezi zástupce neobnovitelných zdrojů, kterým přináležejí zastoupení zbylých devadesáti procent, patří fosilní paliva a jaderná energie. Vyčerpání zásob uhlí či ropy je předpokládáno v horizontu maximálně stovek let. Při těžbě ropy je podstupováno velké riziko s častými nežádoucími dopady na životní prostředí a kvalitu vody v oceánech. Odvětví jaderné energetiky se potýká s velkým množstvím radioaktivního vyhořelého paliva, které musí být skladováno v ochranných kontejnerech v podzemí. Porovnáme-li tyto okolnosti s prací vodních elektráren, není pochyb o jejich opodstatněném umístění na energickém trhu jak v ČR, tak v celém světě.

Přestože voda je neomezenou složkou, tak si musíme uvědomit, že každému území připadá hodnota technicky využitelného hydroenergetického potenciálu. Ten je dán sklonitostí terénu a množstvím proudící vody, což jsou dva hlavní parametry, které jsou posuzovány při návrhu vodní elektrárny.

Jelikož většina z tohoto potenciálu je již v ČR využita většími vodohospodářskými díly, alternativou výstavby jsou právě malé vodní elektrárny v místech, kde doposud zůstaly vhodné sklonové podmínky či na stavbách, kde je již voda vzduta, ale existuje zároveň přebytek nevyužitého průtokového množství. Tato konkrétní situace velmi výstižně charakterizuje právě stav na zřeznamle Klecany, kde ke stávající MVE Klecany I bude přistavěna MVE Klecany II.

S výstavbou nové malé vodní elektrárny však přichází změna a velmi pravděpodobně dojde k ovlivnění stávajícího charakteru proudění vody. Tento fakt může s sebou přinést nežádoucí následky jak na tamní plavbu lodí, tak na provoz stávající MVE. Právě tyto předpoklady daly podnět k vytvoření této práce.

## 2. Cíle

Cílem práce bylo zhodnotit změnu proudových poměrů v toku řeky Vltavy u zdymadla Klecany.

Úkolem bylo zjistit, zdali nově vybudovaná MVE Klecany II, která se plánuje zrealizovat vedle stávající MVE Klecany I, nebude negativně ovlivňovat plavbu, tj. jestli nedojde ke zvýšení příčných rychlostí v trase lodní dopravy v úrovni dělicího piliře či bezprostředně před ním.

Dalším požadavkem zadavatele bylo ověřit návrh tvaru dělicího piliře a umístění usměrňovacích křídel na nátoku do nové plánované MVE Klecany II.

Cílem práce bylo:

- Stanovit vliv výstavby nové MVE Klecany II na plavbu v úrovni piliře oddělujícího plavební kanál od jezové zdrže.
- Srovnat proudové poměry před a po výstavbě MVE Klecany II.
- Posoudit rozdělení rychlostního pole na nátoku do MVE Klecany II.

### 3. Teorie

V této kapitole jsou uvedeny základy matematického modelování s bližším popisem jednotlivých diskretizačních metod. Dále jsou zde přiblíženy základní používané rovnice hydrodynamiky a způsoby řešení problematiky turbulentního proudění. Tyto kapitoly poté navazují na používaný výpočetní software HEC-RAS 5.0.3 (dále jen HEC-RAS), FLOW-3D 11.0 (dále jen FLOW-3D) a širší okolnosti s ním spojené. Teorie byla zpracována ze zdrojů [9] až [15].

#### 3.1. Matematické modelování

Matematické modelování je v dnešní době jedním z velmi důležitých a významných teoretických nástrojů umožňujících řešit fyzikální a technické úlohy. Rozmach této metody je patrný zejména v posledních dvou desetiletích. Princip je založen na abstraktním vyjádření analyzovaného fyzikálního děje, který umožňuje simulaci fyzikálních dějů na skutečných objektech pomocí matematického modelování. Výhodou matematického modelování oproti fyzikálnímu je hlavně jeho menší časová a také finanční náročnost. Jsme schopni snadněji realizovat hned několik variant výpočtu řešeného problému. Přesto je však důležité poznamenat, že správně vytvořený fyzikální model ve vhodném měřítku je vždy více vypovídající. Důvodem je právě nastavení modelu a pochopení daného jevu v dané situaci.

Definice vyjádření termínu „*model*“ je uváděna v řadě lidských činností, a proto pro něj existuje celá řada definic. Vztáhneme-li definici k právě řešené problematice vodního hospodářství, jedná se o účelově zjednodušené zobrazení reálného nebo abstraktního světa. Matematický model je tak popisem určitého výseku vnějšího světa matematickými prostředky. [D10]

Aby mohl být matematický model určitého jevu vytvořen, musí být k dispozici:

- Vlastní model prostředí, ve kterém zkoumaný jev probíhá.
- Matematické vyjádření fyzikálních vztahů mezi veličinami, které se ve zkoumaném jevu vyskytují.
- Diskretizace matematického modelu a metody numerického řešení soustavy rovnic, na které diskretizace modelu vede.

Pod pojmem diskretizace si můžeme představit nahrazení spojitého popisu úlohy diskretním, tj. dojde k rozdělení řešeného trojrozměrného prostoru na výpočetní mřížku pomocí vybraných prvků nebo elementů, tzv. mesh. K tomuto úkonu se používají numerické metody:

- konečných diferencí,
- konečných prvků,

- konečných objemů.

Důležité je zmínit, že diskretizací je do výpočtu vnesena počáteční chyba. Jedná se o chybu mezi přesným řešením rovnic modelu a numerického řešení v elementech výpočetní mřížky. Tento krok je však pro výpočet nezbytný a nelze tuto chybu úplně eliminovat. Můžeme ji však vhodnými opatřeními zmenšit, protože diskretizační chyba klesá s jemnější výpočetní mřížkou. Tedy s rostoucím počtem prvků výpočtového meshe se bude chyba daná diskretizací zmenšovat. [D13]

### 3.1.1. Metoda konečných diferencí (metoda sítě)

Metoda konečných diferencí (MKD) je pravděpodobně nejstarší numerickou metodou a našla své využití ještě před zavedením výkonných číslicových počítačů. Přestože je mnohdy vytlačována metodou konečných prvků, existuje doposud mnoho programů, které fungují na principu této metody, a je tedy stále používána. [D11]

Principem této metody při řešení dané úlohy je, že v řešené oblasti se zvolí konečná množina bodů a vznikne tak ortogonální síť s příslušnými uzly, tj. body. V těchto bodech množiny se daná diferenciální rovnice a eventuálně i okrajové podmínky splní pouze přibližně a to tak, že derivace v nich se vyskytující jsou nahrazeny diferenčními podíly (tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot hledané funkce v okolních bodech, které je aproximují). [D10]

### 3.1.2. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je numerickou metodou, která se používá k řešení a simulaci například průběhů napětí, deformací, proudění tepla, kapalin atd. na vytvořeném modelu.

Princip spočívá v diskretizaci spojitého prostředí do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované výsledné hodnoty jsou počítány v jednotlivých uzlech (bodech). [D12]

Základní myšlenka metody vychází z polynomiální interpolace, nikoliv však jedním typem polynomu na celé oblasti, ale s různými polynomy na podoblastech, na které bylo spojité prostředí diskretizováno. Příslušné funkce jsou pak na dílčích podoblastech rovny polynomům o nižších stupních. [D10] Výhody této metody oproti MKD jsou tedy následující:

- Algoritmus výpočtu není závislý na tvaru zkoumané oblasti.
- Není potřeba dodržovat pravidelnou strukturu sítě (přizpůsobí se řešené oblasti).
- V místech potřeby lze zahustit síť elementy s kombinací různých tvarů.
- Každý prvek může mít obecně různé fyzikální vlastnosti, které je možné během výpočtu měnit na základě získaných mezivýsledků.
- Matice soustavy rovnic jsou symetrické a pásové s dominantní diagonálou. [D11]

### 3.1.3. Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů (MKO) vychází z metody sítí a spočívá ve třech základních bodech:

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic.

MKO je využívána díky své flexibilitě, adaptabilitě a aplikovatelnosti na řešení problémů tekutin v oblastech s komplikovanou geometrií. [D9]

## 3.2. Základní rovnice hydrodynamiky

Hydrodynamika je věda zabývající se zákonitostmi rovnováhy, pohybu kapalin a vzájemným působením kapalin a tuhých těles. Jedná se o jeden z teoretických základů vodního stavitelství a vodního hospodářství.

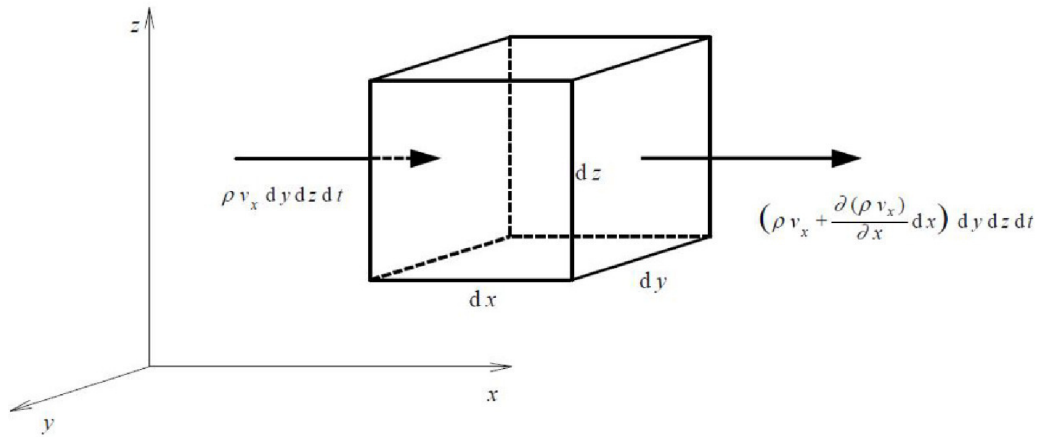
K sestavení základních rovnic hydrodynamiky jsou používány obecně platné zákony a věty klasické mechaniky:

- zákon zachování hmotnosti,
- zákon zachování hybnosti,
- zákon zachování energie,
- stavové rovnice.

### 3.2.1. Zákon zachování hmotnosti

Zákon zachování hmotnosti (ZZH) neboli rovnice kontinuity je diskrétním vyjádřením zákona zachování hmotnosti proudící kapaliny. Zákon zachování hmotnosti lze formulovat následovně: „*Hmotnost libovolného kontrolního objemu tekutiny, obsahující stále stejné částice je konstantní*“.

Ze zákona zachování hmotnosti proudící kapaliny (aplikovaného na nekonečně malý kontrolní element vyjmutý z oblasti proudění) vyplývá, že rozdíl mezi hmotností vlastní kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za časový interval  $dt$  musí být roven časové změně hmotnosti kapaliny v tomto elementu obsažené.



**Obrázek 1 - Spojitost proudu v elementárním hranolu [D10]**

Rozdíl mezi hmotností kapaliny do elementu vtékající a vytékající ve směru osy  $x$  za časový interval  $dt$  (Obrázek 1) je následující:

$$\rho v_x dy dz dt - \left( \rho v_x + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right) dy dz dt = - \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt, \quad (1)$$

kde  $v_x(x,y,z,t)$  je složka vektoru rychlosti ve směru osy  $x$  a  $\rho(x,y,z,t) = f(p,T)$  hustota, která je funkcí tlaku  $p$  a teploty  $T$ .

Obdobně pro osy  $y$  a  $z$  lze vyjádřit rozdíl hmotnosti za časový interval  $dt$  ve tvaru:

$$- \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt \quad \text{a} \quad - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt,$$

kde  $v_y(x,y,z,t)$ , resp.  $v_z(x,y,z,t)$  je složka vektoru rychlosti ve směru osy  $y$ , resp.  $z$ .

Celkový rozdíl hmotnosti kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za  $dt$  je roven:

$$- \left( \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right) dx dy dz dt. \quad (2)$$

Časovou změnu hmotnosti kapaliny obsažené v elementu lze vyjádřit výrazem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt. \quad (3)$$

Srovnáním rovnic (2) a (3) a podělením o výraz  $dx dy dz dt$  získáme diferenciální rovnici (4) popisující zákon zachování hmotnosti kapaliny pro stlačitelnou kapalinu:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (4)$$



Pro nestlačitelnou kapalinu ( $\rho = \text{konstantní}$ ) nabude rovnice kontinuity (4) tvaru:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

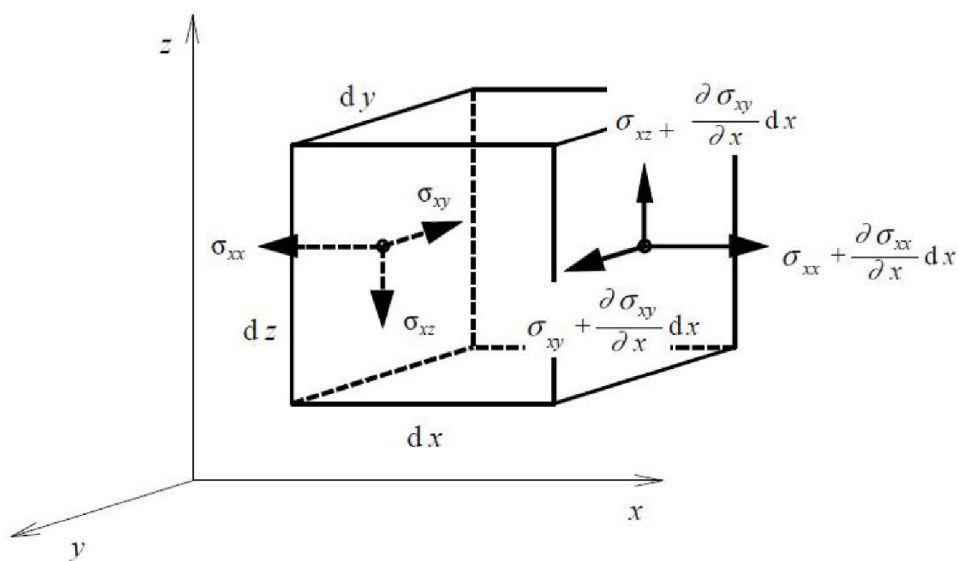
Tuto diferenciální rovnici pro nestlačitelnou kapalinu (5) lze pomocí tzv. Einsteinovy sumační konvence zapsat v kompaktním a úsporném tvaru jako:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (6)$$

kde  $v_i$  je složka vektoru rychlosti  $v$  a  $x_i$  prostorová souřadnice.

### 3.2.2. Pohybová rovnice

Pohybová rovnice je odvozena s využitím zákona zachování hybnosti, který můžeme formulovat následovně: „Změna hybnosti libovolného kontrolního objemu tekutiny se rovná součtu objemových a plošných sil působících na tento objem“.



Obrázek 2 - Složky napětí působící na stěny rovnoběžné s rovinou yz [D10]

Aplikujeme-li druhý Newtonův pohybový zákon na tekutinu procházející nekonečně malým kontrolním objemem, obdržíme následující rovnici:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (7)$$

kde  $v_i$  je vektor rychlosti,  $x_i$  vektor polohy,  $t$  je čas,  $\rho$  je hustota,  $f_i$  je složka vektoru objemového zatížení vztaženého na jednotku hmotnosti a  $\sigma_{ij}$  je tenzor napětí. [D11]

### 3.2.3. Navier-Stokesova rovnice

V předchozí rovnici (7) se vyskytuje člen  $\sigma_{ij}$ , který označuje tenzor napětí. Tenzor třecích napětí je pro Newtonovskou stlačitelnou kapalinu definován vztahem:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda\varepsilon_v\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \quad (8)$$

kde  $p$  je tlak,  $\delta_{ij}$  Kroneckerovo delta,  $\lambda(\rho, T)$  součinitel rychlosti objemového přetvoření,  $\varepsilon_v$  rychlost objemového přetvoření,  $\mu(\rho, T)$  součinitel dynamické viskozity a  $\varepsilon_{ij}$  tenzor rychlosti přetvoření.

Rychlost objemového přetvoření můžeme vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_v = \frac{\partial v_i}{\partial x_i}. \quad (9)$$

Pro součinitel rychlosti objemového přetvoření  $\lambda$  platí:

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu. \quad (10)$$

Tenzor rychlosti přetvoření  $\varepsilon_{ij}$  lze vyjádřit rovnicí:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right). \quad (11)$$

Dosazením výše uvedených vztahů (9), (10) a (11) do rovnice (8) získáme rovnici ve tvaru:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial v_i}{\partial x_i}\delta_{ij} + 2\mu\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right). \quad (12)$$

Dosazením rovnice (12) za  $\sigma_{ij}$  do rovnice (7) obdržíme Navier-Stokesovu rovnici (13). Tato rovnice je nejobecnější rovnicí popisující pohyb Newtonské tekutiny:

$$\rho\frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial\left(-p\delta_{ij} - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial v_i}{\partial x_i}\delta_{ij} + 2\mu\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right)}{\partial x_j}, \quad (13)$$

kde  $v_i$  je vektor rychlosti,  $x_i$  vektor polohy,  $t$  je čas,  $\rho$  je hustota,  $f_i$  je složka vektoru objemového zatížení  $f$  vztaženého na jednotku hmotnosti,  $\varepsilon_v$  rychlost objemového přetvoření a  $\mu$  součinitel dynamické viskozity. [D10]

Pokud však zanedbáme vliv objemového přetvoření, tj. uvažujeme objemově stálou tekutinu, nabude rovnice (12) tvaru:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}. \quad (14)$$

Pro nestlačitelnou kapalinu s konstantní viskozitou je Navier-Stokesova rovnice (13) upravena do tvaru [D11]:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2}. \quad (15)$$

### 3.3. Turbulentní proudění

Osborne Reynolds za pomoci pokusů dokázal, že existují dva odlišné režimy proudění kapaliny. Jedná se o laminární a turbulentní režimy. Při laminárním pohybu jsou částice v kapalině v plynulém a vzájemně rovnoběžném pohybu, naopak při turbulentním (neuspořádaném) jsou částice unášeny v nepravidelných drahách a vektor rychlosti je v čase proměnný.

Základním kritériem režimu proudění je Reynoldsovo číslo, které se vypočítá pro otevřená koryta dle vztahu:

$$Re = \frac{vR}{\nu}, \quad (16)$$

kde  $v$  je střední průřezová rychlost proudění,  $R$  hydraulický poloměr a  $\nu$  kinematičká viskozita kapaliny.

Bylo zjištěno, že pokud hodnota Reynoldsova čísla je vyšší jak 3450, jedná se o plně turbulentní proudění, se kterým se setkáváme v praktických případech s volnou hladinou. [D15]

Mezi základní vlastnosti turbulentního proudění tedy patří:

- Náhodný charakter proudění – základní charakteristika turbulentního proudění, která vede k využití statických metod ve výzkumu turbulence.
- Difúzivita – schopnost přenášet hybnost, energii a různé skalární veličiny. Její míru je možné charakterizovat součinitelem turbulentní difúze příslušné veličiny.
- Disipace energie – přeměna turbulentní kinetické energie na tepelnou v důsledku práce viskozních napětí.
- Trojrozměrný charakter – spočívá v tom, že fluktuace (pohyby sem a tam) jsou způsobované deformací vírů. [D10]

Modelování turbulence pro nestlačitelné vazké tekutiny lze matematicky popsat pomocí Navier-Stokesovy rovnice (Kap. 3.2.3.). K vlastnímu modelování turbulence jsou používány metody, které můžeme rozdělit do 3 skupin:

- DNS,
- LES,
- RANS.

Metoda DNS (Direct Numerical Simulation) je metoda přímé numerické simulace a představuje modelování Navier-Stokesovy rovnice pomocí numerických metod. Tato metoda je z důvodů vysokých hardwarových nároků používána velmi omezeně.

Metoda LES (Large Eddy Simulation) je metoda modelování velkých vírů, která je založena na dekompozici proudového pole na vírové struktury o velkých a malých měřítkách.

Poslední metodou je metoda RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), která je využívána u převážné většiny praktických úloh v CFD (Kap. 3.4.). Principem této metody je rozklad okamžité hodnoty veličiny popisující proudění na složku střední hodnoty a složku fluktuace. V případě modelování proudění nestlačitelné vazké tekutiny jsou neznámými veličinami popisujícími proudění tekutiny rychlost a tlak.

Existuje celá řada turbulentních modelů. V rámci programu FLOW-3D byl využit dvourovnicový  $k$ - $\varepsilon$  model, který k vyjádření turbulentní viskozity využívá kinetickou turbulentní energii  $k$  a její disipaci  $\varepsilon$ . Blíže je tento model popsán například v manuálu programu HEC-RAS nebo FLOW-3D. [D13]

### 3.4. Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) je jednou z podoblastí numerického modelování, která se zabývá simulacemi proudění kapalin a plynů jak v jednofázovém, tak vícefázovém proudění. Jedná se především o proudění s volnou hladinou, přestup tepla, transport sedimentu apod.

Softwarové CFD modelování je v mnoha ohledech podobné fyzikálnímu. Pokud není fyzikální model správně nastaven vůči reálné situaci, pak výsledky nebudou odpovídající skutečnosti. Obdobně, pokud numerický model není dostatečně reprezentativní reálné situaci, výsledky opět nebudou odrážet skutečné chování.

Základem CFD je Navier-Stokesova rovnice, která popisuje proudění viskózní kapaliny a její spektrum použití je velmi široké. Vzhledem k charakteru rovnice lze získat analytické řešení pouze pro ty nejjednodušší úlohy proudění, a proto se pro řešení úloh používají metody numerické

matematiky. Spojitý problém je převeden na diskrétní, tj. diferenciální rovnice je převedena na soustavu lineárních rovnic. Tato soustava je dále řešena iteračně, což činí numerické metody náročnými na výpočetní čas i výkon techniky k tomu zvolené.

S vývojem výpočetní techniky se metoda CFD stala dostupnou širokému spektru uživatelů, což přináší i svá rizika. CFD modely pro zadanou úlohu téměř vždy vypočítají výsledek, který může, ale zároveň také nemusí být správný. Nezkušené uživatelé pak tyto výsledky mohou považovat za správné, aniž by je kriticky analyzovali a vyhodnotili tak jejich realnost.

Důležité pro úspěšné provedení simulace je, aby řešitel měl potřebné znalosti o použitých modelech a dokázal tak zvolit správné nastavení výpočtové sítě a parametry pro konkrétní problém. [D13]

### **3.5. FLOW-3D**

V současné době si zájemce o CFD může vybrat z širokého spektra nabídky softwarových prostředků. Jedním z nich je právě FLOW-3D od společnosti Flow Science Inc. Jedná se o software, jehož silnou stránkou je řešení úloh v oblasti proudění s volnou hladinou jak pro ustálené, tak pro neustálené proudění. Jeho velkou výhodou je definování pouze jedné kapaliny (např. vody), což znamená usnadnění vlastní tvorby simulace. Ve většině programů se totiž setkáváme s podmínkou simulace obou tekutin (např. voda a vzduch).

U některých úloh stacionárního proudění je možné volnou hladinu definovat jako horní hranici výpočetní oblasti a řešenou úlohu tak převést na „tlakové proudění“. Právě na základě této úlohy ve 2D byl navržen tvar stávajícího nátoku na MVE Klecany I v roce 1999.

V této práci byly výpočty provedeny ve 3D modifikaci s volnou hladinou, kdy na rozhraní voda – vzduch bylo aplikováno okrajových podmínek atmosférického tlaku. Na rozhraní tekutin tak neprobíhal žádný tok a síly tedy byly v rovnováze.

Pro řešení volné hladiny existuje mnoho různých metod. V současné době se v CFD softwarech nejčastěji používá metoda Volume of Fluid (VOF – Kap. 3.6.) a výjimkou není ani FLOW-3D.

### **3.6. Volume of Fluid**

Metoda Volume of Fluid (VOF) byla vyvinuta pro řešení stacionárního i nestacionárního proudění v roce 1981 Hirtem a Nicholsem (Obrázek 3).

Principem metody je, že každé výpočetní buňce je přiřazena hodnota objemové frakce vody, která je definována následovně:

$$F = \frac{V_{vody}}{V_{buňky}}, \quad (16)$$

kde  $V_{vody}$  je objem vody obsažený ve výpočetní buňce a  $V_{buňky}$  je celkový objem vlastní výpočetní buňky. Na základě hodnoty objemové frakce jsou rozlišovány tři případy:

- $F = 1$       => buňka obsahuje pouze vodu,
- $F = 0$       => buňka obsahuje pouze vzduch,
- $0 < F < 1$    => buňka obsahuje obě fáze – volná hladina.

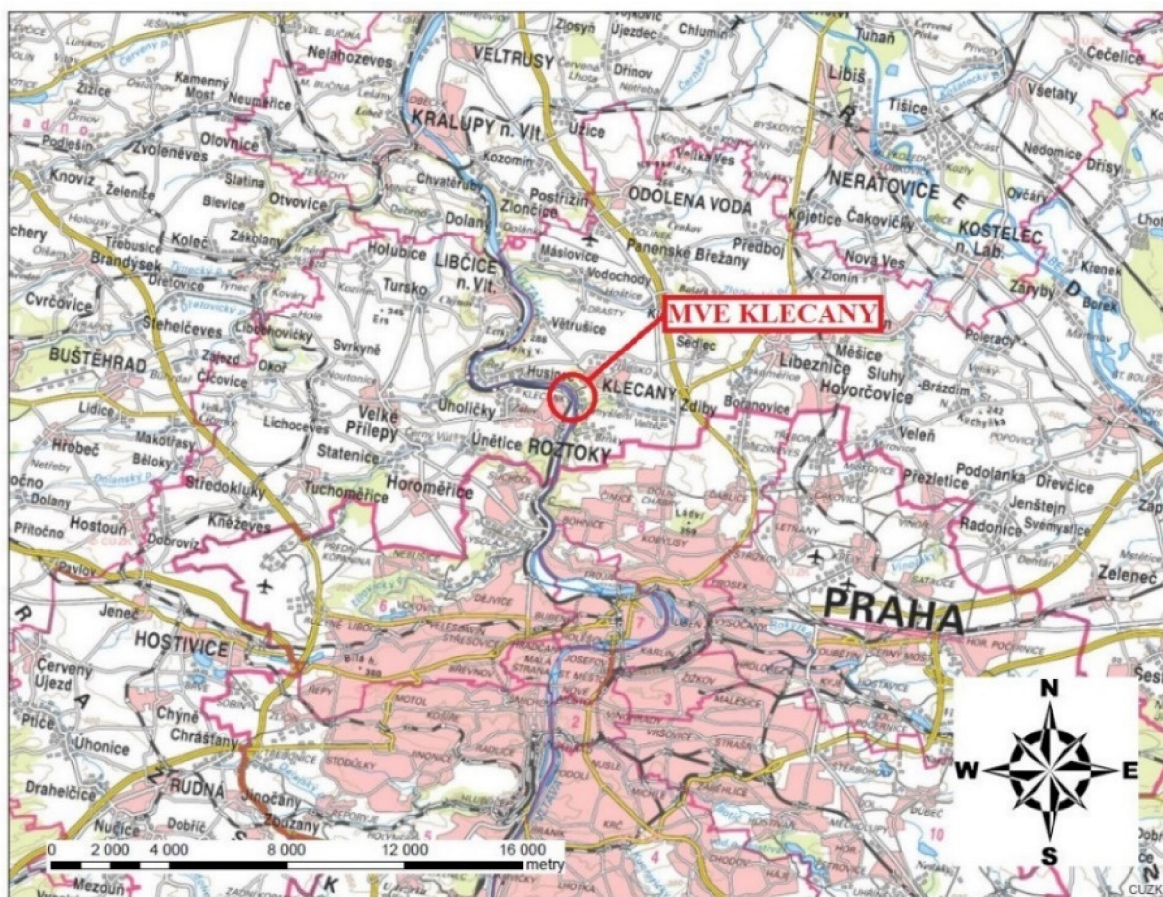


**Obrázek 3 - Hodnoty objemové frakce vody při použití VOF (volná hladina) [D14]**

Na tyto metody pak dále navazují metody k určení detekce hladiny.

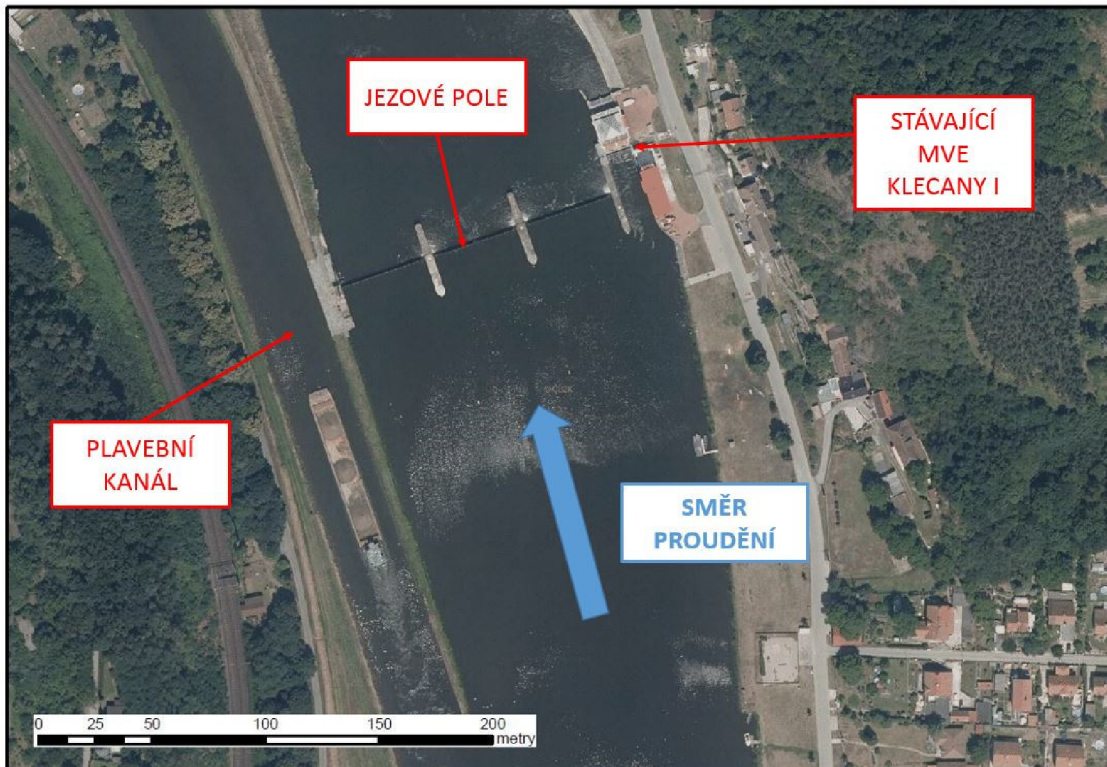
## 4. Popis lokality

Vodní dílo Klecany – Roztoky se nachází ve Středočeském kraji na řece Vltavě v okrese Praha – východ. Jezové těleso leží na říčním kilometru 37,08. Na obrázku (Obrázek 4) je zobrazena situace širších vztahů s červeným vyznačením lokality.



Obrázek 4 – Situace širších vztahů [C2]

Hlavní části jezu jsou zobrazeny na detailnějším obrázku (Obrázek 5) včetně popisů a směru proudění. V plavebním kanále si můžeme všimnout jedné z lodí využívající plavební cestu.



Obrázek 5 - Popis zdymadla s vyznačeným směrem proudění [C1]

Úsek s vodním dílem Klecany spadá do IV. třídy dle klasifikace vnitrozemských cest. Jedná se o dolní úsek Vltavy (Obrázek 6). Úsek u vodního díla Klecany je splavný do průtoku  $Q = 450 \text{ m}^3/\text{s}$ , což je pro představu průtok mezi  $Q_{30d}$  a  $Q_1$ .



Obrázek 6 - Vodní cesta – úsek Dolní Vltavy [D6]



Vltavská vodní cesta byla provozována podle historických pramenů již v sedmém století, kdy nejčastěji dopravovaným zbožím byla sůl. Následně v dobách Karla IV. se budovala opatření, která měla plavební podmínky zlepšovat.

V roce 1896 byla založena „Komise pro kanalizování Vltavy a Labe v Čechách“. Její iniciativou došlo v historicky krátké době k vybudování 11 zdymadel. Jedním z těchto zdymadel bylo právě vodní dílo Klecany, které bylo mezi prvními realizovanými díly. [D1]

Výše uvedený zdroj dále uvádí, že po většinu roku by měla být zaručena plavební hloubka 2,1 m, která by měla umožňovat plavbu lodí o hmotnosti 1000 tun. Přestože je tento plavební úsek zařazen do IV. třídy plavební cesty, není splněna požadovaná plavební hloubka 3,3 m dle vyhlášky Ministerstva dopravy o vodních cestách, plavebním provozu v přístavech, společné havárii a dopravě nebezpečných věcí [D8]. Na základě dokumentace, podle které byly modely vytvářeny, se hloubka pohybuje kolem 2,6 m. Podle posledních zjištěných informací se vede diskuze o prohloubení dna až na požadovanou plavební hloubku 3,3 m. Tyto nejasnosti však nebyly předmětem řešení, ale bylo by vhodné je prověřit.

#### **4.1. Vodní dílo Klecany-Roztoky**

Jedná se o zdymadlo se třemi jezovými poli, plavebním kanálem ústícím do plavební komory lícující levý břeh a MVE Klecany I nacházející se na pravém břehu Klecánek (vesnice spadající pod město Klecany). Nová MVE byla vybudována v roce 2001 a nahradila tak původní přelévanou elektrárnu žlabového typu, která byla v provozu již od 80. let. Po povodních v roce 2002 došlo k poškození mnoha okolních budov včetně vlastní elektrárny. Tato událost si vyžádala její velmi brzkou rekonstrukci a k opětovnému spuštění došlo v roce 2003.

##### Účel vodního díla:

- zajištění plavebních podmínek,
- stabilizace minimální hladiny a spádových poměrů říční tratě,
- využití hydroenergetického potenciálu průběžnou malou vodní elektrárnou,
- zajištění smluvních odběrů vody.

Jezovou zadrž lze využívat také pro rekreaci, sportovní rybolov či sportovní plavbu. V manipulačním řádu [A1] je také uvedena varianta využití i pro krátkodobého nalepšení průtoků v toku pod vodním dílem při výskytu lokálního znečištění, například při havárii.

##### *4.1.1. Charakteristika jezové zadrž*

Délka vzdutí způsobené jezovou konstrukcí je 6,5 km s průměrnou hloubkou ve zdrži 3 m. Objem jezové zadrž je 2,4 mil. m<sup>3</sup>.

Jezové těleso je rozděleno na 3 jezová pole. Šířka pravého pole je 40,18 m, zbývající dvě pole mají světlost menší, tj. 38,90 m. Jako ovládací mechanismus je zde použito šesti ocelových dutých klapek s maximální hrazenou výškou 3,3 m. Horní hrana sklopené klapky při manipulaci je v nadmořské výšce 171,90 m n. m. a při vztyčené poloze až na úrovni 175,20 m n. m. V každém poli jsou dvě klapky o délkách, které odpovídají polovině daným délkám světlosti polí a poloměru 6975 mm. Ovládány jsou vždy dvojicí hydraulických válců. Klapky jsou vzájemně těsněny gumovým profilovým těsněním, vodorovná spára je proti úniku vody zabezpečena v ose otáčení pryžovým těsněním tvaru Z. Pro eliminaci negativního působení proudící vody na konstrukci v úrovni přelivné hrany klapky byly vybudovány rozražeče po osově vzdálenosti 2,10 m.

Pro případné opravy na jezové konstrukci je využíváno provizorního hrazení hradlového (Obrázek 7). Hradla byla zvolena ocelová. Tamní situace si žádá aplikaci hrazení jak proti horní, tak také proti dolní vodě. K jejich osazení je potřeba zajistit přítomnost jeřábu a asistenci potápěčů. [A1]



**Obrázek 7 - Instalace ocelového hradlového provizorního hrazení v pravém poli [D2]**

Po sklopení klapky do nejnižší polohy tvoří klapka s jezovým prahem konstrukci o tvaru Jamborova prahu, ve kterém je vybudována komunikační štola o velikosti  $1,80 \times 2,17$  m, kterou je umožněna kontrola ovládacích mechanismů.

Pro utlumení přepadové energie vody byl vybudován vývar o délce 12,40 m se šikmým prahem ve sklonu 1:3 a výšce 1,25 m.

#### 4.1.2. Charakteristika plavebního zařízení Roztoky

Tento prostor lze rozdělit na dvě části. První částí je přívodní kanál, který při plavbě po proudu přivádí lodě k části druhé, tedy k vlastním plavebním komorám. Stejně tomu je i v opačném směru, avšak dolní úsek kanálu je výrazně kratší a jeho začátek je právě u jezové konstrukce.

##### Plavební kanál

Plavební kanál lze rozdělit na část horní a dolní. Horní úsek je dlouhý 950 m a šířka ve dně je 20 m s plavební hloubkou 2,5 m. Sklony svahů jsou provedeny v poměru 1:2 až 1:1,5, jako opevnění břehů je využito dlažby z lomového kamene. Při vjezdu do plavebního kanálu je nainstalována štětová stěna o délce cca 150 m. Dolní úsek je délky cca 100 m a svým konstrukčním provedením je totožný s úsekem horním. Na výjezdu z plavební komory jsou použity ocelové štětovnice typu Larsen.

##### Plavební komory

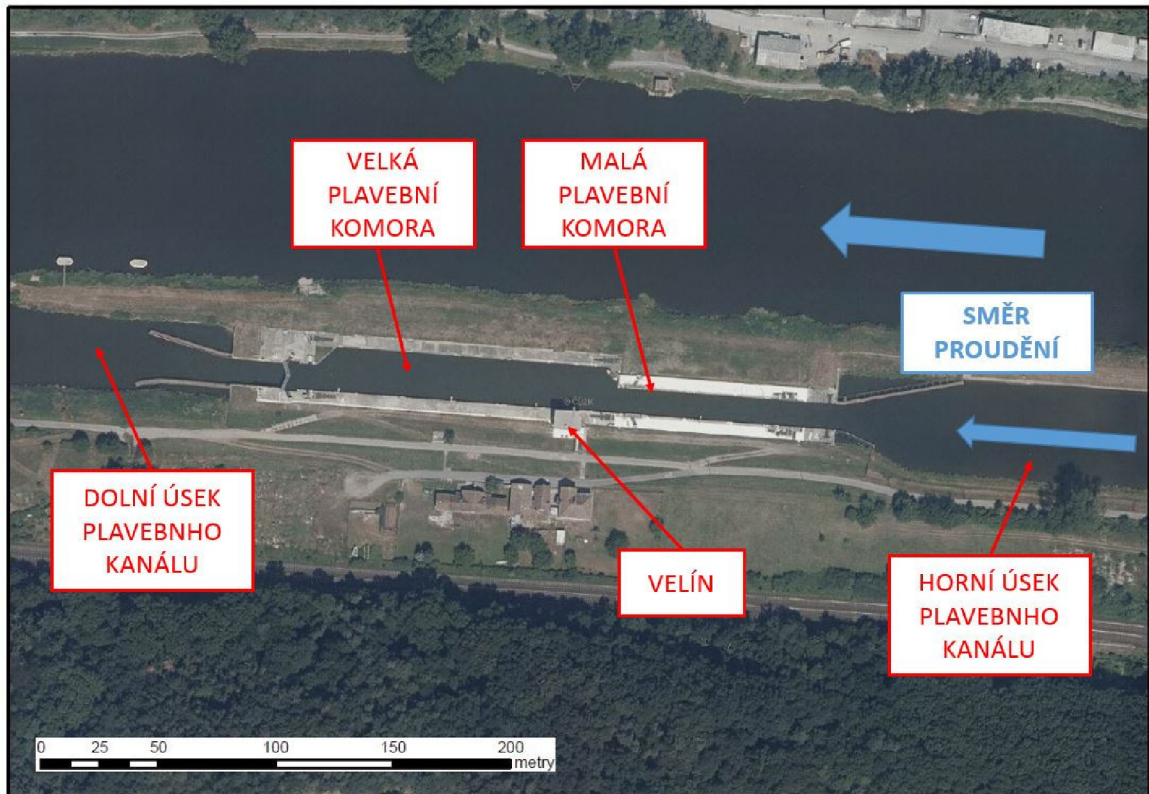
Plavebním kanálem lodě připlouvají na dvě plavební komory (Obrázek 8), které jsou situovány za sebou. Velká plavební komora má svislé zdi opět ze štětovnic Larsen. Štětovnice jsou zaberaněny do dna a v horní části ukotveny do pomocné štětové stěny, která je ukončena železobetonovým nosníkem o šířce 1 m. Dno je tvořeno jako rovinná betonová deska. Ve stěnách obou komor jsou nainstalovány žebříky a vázací pacholata.

K plnění a prázdnění plavebních komor dochází dlouhými obtokovými kanály s otvory, které jsou vyříznuty ve štětové stěně ve výšce těsně nade dnem. Ve finální části se plavební komora plní také sklápěním klapkových vrat. Pozdějšímu prázdnění napomáhají žaluzie, které jsou osazeny na dolních vratech. Vrata jsou ovládána přímo z místa nebo z tamního velína.

Při povodních nad průtok  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  lze plavební komory využít k převádění velkých vod.

##### ***Základní parametry plavebních komor:***

- Užité rozměry velké plavební komory: 132,40 × 19,20 m
- Užité rozměry malé plavení komory: 58,50 × 11,00 m
- Světla výška: 7 m
- Šířka ohlaví: 11 m
- Maximální předpokládaný spád: 3,3 m [A1]



Obrázek 8 - Pohled na plavební komory s vyznačeným směrem proudění [C1]

### *Doby manipulací:*

- Otevření (uzavření) horních vrat: 180 s
- Otevření (uzavření) středních vrat: 80 s
- Otevření (uzavření) dolních vrat: 80 s
- Otevření (uzavření) horních obtokových uzávěrů: 80 s
- Otevření (uzavření) středních obtokových uzávěrů: 80 s
- Otevření (uzavření) dolních obtokových uzávěrů: 80 s
- Doba plnění (prázdnění) malé plavební komory: 300 s
- Doba plnění celé plavební komory: 8 min. 52 s
- Doba prázdnění celé plavební komory: 8 min.

### Velín

Velín se nachází na levém břehu plavebních komor (Obrázek 9). Z těchto prostor lze ovládat vrata a uzávěry. Světelná signalizace sloužící pro komunikaci mezi správou velína a lodní dopravou je umístěna společně s kamerou na provozní budově jezu. Další kamery jsou nainstalovány na horním a dolním ohlaví pro sledování horních a dolních vrat. [A1]



**Obrázek 9 - Popravní pohled na velín a uzavřená střední vrata mezi plavebními komorami [D3]**

#### *4.1.3. Charakteristika stávající MVE Klecany I*

V této kapitole jsou popsány základní části stávající elektrárny. Jedná se o vtokový objekt, vlastní stavbu elektrárny a na ni navazující výtokový objekt.

##### Vtokový objekt

Vtokový objekt slouží k přivedení vody k MVE. Při výstavbě v roce 2001 byla část původního vtoku odbourána, došlo k odstranění zalomeného prahu ze štětovic Larsen a odstranění manipulační lávky včetně usměrňovacích křídel. Dále došlo k zachování stávající kontrolní chodby, která byla do projektu zapracována.

Dno i stěny kanálu jsou železobetonové. Při výstavbě bylo částečně využito stávajících konstrukcí původní vorové propusti, neboť šířka 12 m byla s propustí shodná. Tloušťka betonové desky je 0,8 m.

Nový vtokový práh byl vybudován na kótě 171,90 m n. m. s rezervou 0,5 m nade dnem toku, aby nedocházelo k vnikání splavenin sunutých po dně. Vtok je z důvodu zanechání kontrolní chodby spádově řešen ze dvou částí. První část od nátokového prahu stoupá v negativním sklonu 1:3 až na výšku překonávající úroveň výšky chodby, tj. na výšku 172,90 m n. m. Stropní konstrukce tak tvoří zároveň část nátoku ve tvaru Jamborova prahu. Následně v opačném spádu nátok klesá až ke dnu přechodového kusu, který je na úrovni 170,30 m n. m.

Na nátoku se nachází tři usměrňovací železobetonová křídla hydraulicky vhodného tvaru, která byla navržena pomocí 2D matematického modelu turbulentního proudění na FAST VUT Brno v roce 1999.

### Spodní stavba MVE

Malá vodní elektrárna Klecany I je průtočnou elektrárnou, která je vybavena dvojicí Kaplanových turbín v provedení „S“. Velikosti oběžných kol vyrobených firmou Hydrohrom spol. s. r. o jsou v průměru 2,3 m. Převod na generátory umístěné v horní stavbě je zajištěn řemeny. Vzdálenost podélných os turbín od sebe činí 5,25 m a osy oběžných kol jsou výškově umístěny na kótě 171,90 m n. m.

Železobetonové vtoky do tlakových částí jsou osazeny jemnými česlemi. Rozděleny jsou dělicím pilířem s polokruhovým zhlavím. Výška vtoku je 4,6 m, šířka 5,25 m.

Česle mají světlost 60 mm a jsou vybaveny dvojicí čistících strojů, které jsou poháněny hydraulickým pohonem. Jejich sklon je 60°. V současnosti jsou shrabky shrabovány do žlabu, odkud jsou odplavovány tlakovou říční vodou do kontejnerů, a tím připraveny k odvozu. Vlivem výstavby nové elektrárny bude provedena změna s jejich manipulací. Po výstavbě budou ukládány do upravené jámy vedle vtoku, ze které budou dopravovány drapákovým jeřábem do samotného kontejneru.

Vtoky na turbíny jsou uzavírány dvěma rychlouzávěrovými tabulemi, které jsou ovládány hydraulikou. Oba výtoky ze savek jsou opatřeny dvojicí nezávislých tabulových uzávěrů. Provizorní hrazení je uloženo v prostoru nad savkami. Osazení je prováděno autojeřábem. Jedná se o sadu dvou tabulí určenou pro jednu savku.

### Horní stavba MVE

Horní stavba navazuje bezprostředně na spodní stavbu. Jelikož je připouštěna možnost zaplavení až průtokem  $Q_{100}$ , tak je provedena z odpovídající kvality betonu dle ČSN. Z tohoto důvodu nemá budova žádná okna. Půdorysné rozměry jsou  $13,8 \times 12,0$  m s výškou 5,6 m nad okolním terénem.

Přístup k vodotěsným tlakovým dveřím je umožněn částečně krytým venkovním schodištěm. Vstup je chráněn do úrovně hladiny  $Q_2$ , poté již musí být dveře uzavřeny, aby nedocházelo k zaplavení vnitřních prostor.

### Hlavní parametry MVE Klecany I:

• Horní hydrostatická hladina do $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ :	175,00 m n. m.
• Horní hydrostatická hladina nad $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ :	174,70 m n. m.
• Dolní hydrostatická hladina:	172,10 m n. m.
• Turbíny:	Přímoproudé horizontální
• Typ:	SemiKaplan Hydrohrom SSK
• Počet:	2
• Průměry oběžných kol:	2 300 mm
• Maximální hltnost turbín:	$2 \times 21 \text{ m}^3/\text{s}$
• Provozní spád:	1,3 – 2,6 m
• Maximální instalovaný výkon:	$2 \times 482 \text{ kW}$
• Otáčky turbíny:	125 ot/min
• Roční výroba v průměrném vodním roce:	6 300 MWh
• Generátory:	Horizontální synchronní
• Počet:	2
• Jmenovitý výkon:	500 kW
• Jmenovité napětí:	400 V

### Výtokový objekt

Jakmile voda opouští prostor savek, vtéká právě do výtokového objektu. Konstrukčně se jedná o polorámovou ŽB konstrukci s nábrežní zdí, dělicím pilířem a dnem ve tvaru zborcené přímkové plochy. [A1]

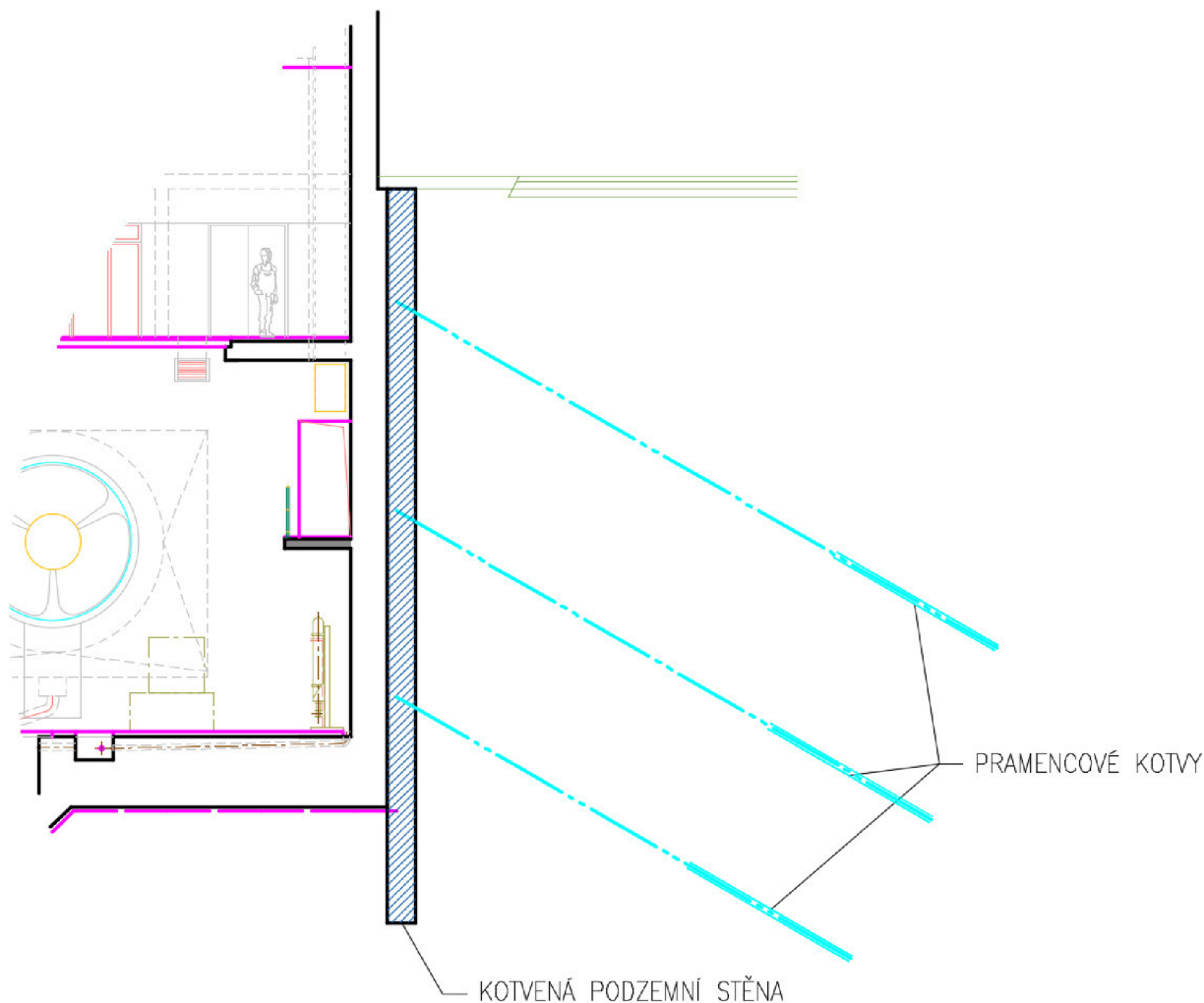
#### *4.1.4. Charakteristika plánované MVE Klecany II*

Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, nově vybudovaná průtočná MVE Klecany II bude umístěna vedle stávající MVE Klecany I. Z urbanistického a architektonického pohledu nedojde na stávajícím objektu k zásadním změnám. Účelem stavby bude energetické využití vody pro výrobu elektrické energie.

### Vtokový objekt

Vtokový práh bude na shodné výškové úrovni jako u stávajícího nátoky, tj. 171,90 m n. m. a plynule na něj naváže. Dno vtoku bude provedeno jako přímková zborcená plocha z železobetonu. Dělicí pilíř byl navržen tak, aby splňoval hydraulicky vhodné podmínky. K tomu mají napomáhat také dvě nová usměrňovací křídla.

Stěna vtokového objektu bude tvořena ze dvou částí. V první řadě bude vybetonována podzemní stěna, která bude vetknuta do nepropustného podloží a přikotvena pramencovými kotvami. Na tuto stěnu bude následně přikotvena a zabetonována druhá vrstva, která bude tvořit líc vtokového objektu (Obrázek 10).



**Obrázek 10 - Stěna vtokového objektu MVE Klecany II [B4]**

Drážky provizorního hrazení budou umístěny ve stěnách vtoku. Hrazení bude probíhat typovými trubkovými hradidly o světle šířce 12 m. Manipulace s dílci bude prováděna jeřábem.

#### Spodní stavba MVE

Vlastní budova MVE Klecany II bude řešena jako podzemní objekt. Šířka objektu bude 11,35 m a délka 38,8 m. V prostorách spodní stavby strojovny bude umístěna přímoproudá Kaplanova turbína. Průměr oběžného kola byl navržen 3,5 m. Při výstavbě strojovny bude použit vodostavební beton.



Vtok do tlakové části bude obdélníkového průřezu. Před ním budou umístěny jemné česle, které budou spravovány automatickým pojízdným čistícím strojem. Shrabky budou ukládány do kontejneru, který bude umístěn přímo u čistícího stroje.

Spodní stavba MVE bude opět zapuštěna pod úroveň okolního terénu a základová spára bude ležet na skalním podloží na úrovni 167,40 m n. m.

V dolním podlaží stavby bude umístěna vlastní PIT turbína s potřebným příslušenstvím, tj. s čerpacími agregáty, mazacím a chladicím zařízením. Dále zde bude umístěna jímka pro sběr prosáklé vody s dvojicí ponorných kalových čerpadel. PIT turbína, kuželová část vtoku a savka budou ocelové, zbývající části budou provedeny jako železobetonové konstrukce.

Uzavření vtoku na turbínu bude možné provést hradíci tabulemi provizorního hrazení umístěnými za jemnými česlemi. Bude se jednat o trubková hradidla šířky 12 m.

Výtok ze savek turbín bude možné provizorně zahradit pomocí hradících tabulí, se kterými se bude manipulovat autojeřábem.

#### Horní stavba MVE

Přístup do vlastní budovy bude umožněn venkovním schodištěm. Vstup do stávajícího velínu bude upraven a nahrazen společným schodištěm. Strop a střecha nad objektem budou opět z železobetonu. Vybudovány budou montážní otvory sloužící pro případnou demontáž technologie. Uzavřeny budou pomocí ocelových tlakových poklopů. Dále bude pod stropem strojovny osazen mostový jeřáb.

Hlavní parametry MVE Klecany II:

- Turbína: Přímoproudá horizontální
- Typ: PIT Kaplan
- Počet: 1
- Průměr oběžného kola: 3 500 mm
- Maximální hltnost turbíny: 70 m<sup>3</sup>/s
- Pracovní rozsah průtoků: 30 – 70 m<sup>3</sup>/s
- Návrhový spád: 2,4 m
- Maximální instalovaný výkon: 1750 kW
- Otáčky turbíny: 80 ot/min
- Roční výroba v průměrném vodním roce: 9520 Mwh
- Generátory: Horizontální synchronní
- Počet: 1
- Jmenovitý výkon: 1800 kW
- Jmenovité napětí: 6300 V

Výtokový objekt

Výtokový objekt bude odvádět vodu od savky do prostoru koryta řeky Vltavy. Bude se jednat o samostatný železobetonový dilatační blok. Výtokový práh bude výškově umístěn na úrovni dna koryta, tj. ve výšce 169,90 m n. m. Geometricky se bude jednat o přímkovou zborcenou plochu.

**4.2. Hydrologická data**

- Číslo hydrologického pořadí: 1-12-02-017
- Plocha povodí: 27 278 km<sup>2</sup>
- Průměrná dlouhodobá roční výška srážek: 660 mm
- Průměrný dlouhodobý roční průtok: 149,2 m<sup>3</sup>/s

**Tabulka 1 - Tabulka m-denních průtoků neovlivněných – období 1931–1980 [A1]**

dní	30	60	90	120	150	180	210
m <sup>3</sup> /s	337,8	234,7	182,1	147,9	122,9	103,3	87,1
dní	240	270	300	330	355	364	
m <sup>3</sup> /s	73,3	61,0	49,6	38,3	27,4	21,0	

Důležité je upozornit, že minimální průtoky jsou ovlivňovány důsledkem hospodaření Vltavské kaskády. Minimální odtok z vodního díla Vrané je 40 m<sup>3</sup>/s. [A1]

Vodní nádrž Vraně je prvním, a tedy nejstarším stupněm Vltavské kaskády. Výstavba proběhla v roce 1931. Nachází se na ř. km 71,325. [D4]

**Tabulka 2 - Tabulka m-denních průtoků ovlivněných – období 1956–1990 [A1]**

dní	30	60	90	120	150	180	210
m <sup>3</sup> /s	304,0	220,0	180,0	150,0	127,0	112,0	99,8
dní	240	270	300	330	355	364	
m <sup>3</sup> /s	89,0	78,3	67,7	58,5	47,4	37,0	

**Tabulka 3 - Tabulka N-letých průtoků Q<sub>N</sub> [A1]**

roků	1	2	5	10	20	50	100
m <sup>3</sup> /s	781	1113	1621	2049	2513	3177	3726

## 5. Tvorba 3D modelu

Tato část práce se věnuje vlastní tvorbě modelu, který byl vytvořen z několika částí z výkresových podkladů [B1] až [B7]. Dále je kapitola rozdělena na dvě části. První část se zabývá realizací modelu stávajícího stavu s nátokem na MVE Klecany I. Druhá část přísluší druhé variantě, kdy byl model stávajícího stavu rozšířen o plánovanou MVE Klecany II.

Modely posloužily jako podklad pro veškeré výpočty jak v kompletním stavu pro porovnání vlivu na plavbu důsledkem dodatečné výstavby elektrárny, tak následně jako dílčí podklad pro posouzení tvaru a umístění usměrňovacích křídel nové MVE Klecany II. Při těchto výpočtech byly z obou modelů použity pouze části obsahující nátoky na MVE s nezbytně nutným úsekem toku. Pro výpočty tedy byly připraveny tyto modely:

- model stávajícího stavu (vliv na plavbu),
- model nového stavu s MVE Klecany II (vliv na plavbu),
- model stávajícího stavu (posouzení tvaru nátoky a umístění usměrňovacích křídel),
- model nového stavu s MVE Klecany II (posouzení tvaru nátoky a umístění usměrňovacích křídel).

### 5.1. Model stávajícího stavu

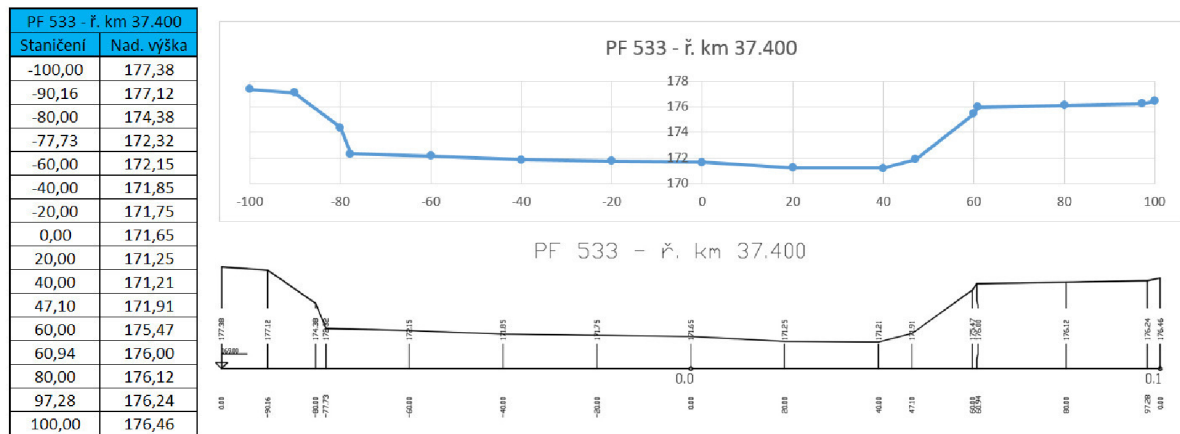
Prvním krokem bylo vytvoření koryta toku ze zaměřených příčných profilů [B6], dalším vytvořit plavební komoru z geodetických podkladů [B7]. Třetí úkol spočíval ve vymodelování vlastního nátoky na stávající MVE Klecany I [B1], [B2]. Jednotlivé operace jsou popsány v následujících kapitolách.

#### 5.1.1. Vytvoření modelu koryta toku

Tato kapitola se zabývá vytvořením digitálního modelu koryta toku. Postup prací byl již podrobně popsán v mé bakalářské práci [D5], proto zde zmíním okrajově pouze hlavní úkony.

##### Zpracování vstupních dat v programu MS Excel

Pro vytvoření digitálního modelu koryta bylo použito zaměřených příčných profilů toku [B6]. Jelikož se jednalo o výkresové formáty .dwg, bylo nutné data zpracovat do textové formy (Obrázek 11).



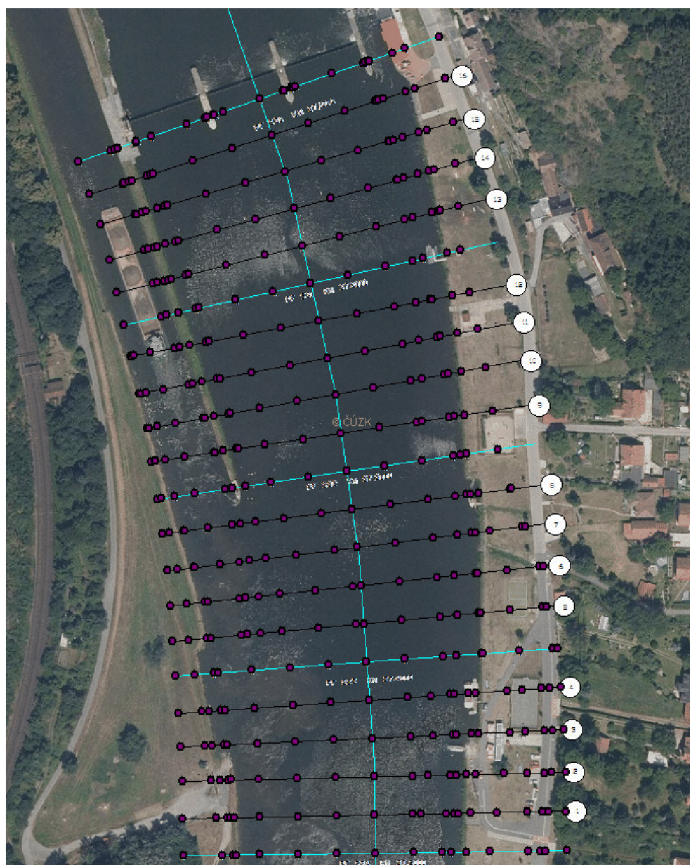
Obrázek 11 - Zpracování zaměřených dat v MS Excel

### Tvorba digitálního modelu koryta

S takto zpracovanými daty bylo možné dále pracovat. Vhodným naprogramováním MS Excel šlo dopočítat skutečné souřadnice všech zaměřených bodů. K tomuto výpočtu bylo nutné znát souřadnice dvou bodů, které ležely na daném zaměřeném příčném profilu. Například bodu na ose toku a jednoho dalšího bodu, kterým se dal určit úhel natočení daného profilu.

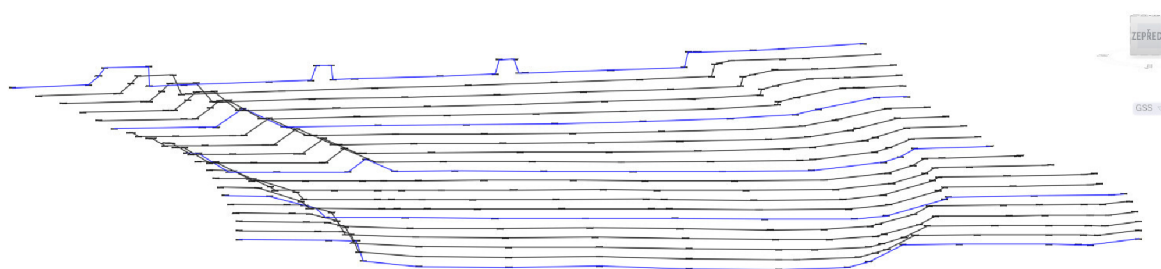
Využitím souladu práce v souřadnicích X, Y a Z v programech Civil 3D a ArcMap bylo možné importovat vypočtené souřadnice do programu ArcMap. Po vložení dat se získala vizuální kontrola o správnosti vypočtených souřadnic (Obrázek 12).

Modelovaný úsek toku byl dlouhý přibližně 400 m. Na této části toku bylo k dispozici 5 zaměřených příčných profilů [B6], které jsou označeny modrou barvou ve vzdálenostech 100 m (Obrázek 12). Pro přesnější výsledný model bylo vhodné těchto 5 profilů vložit do programu HEC-RAS a využít ho pro jeho dobré interpolační schopnosti. Díky interpolaci byly získány dílčí souřadnice příčných profilů, které bylo možné posunout a natočit dle bodů v situaci [B5] a pracovat s nimi nadále jako s profily skutečně zaměřenými. Takto bylo dohromady získáno 21 profilů, které již byly dostačujícím podkladem k vytvoření modelu dna a břehů koryta.



Obrázek 12 - Import souřadnic bodů příčných profilů do programu ArcMap [C1]

Dalším krokem byl export dat z programu ArcMap do programu Civil 3D (Obrázek 13).

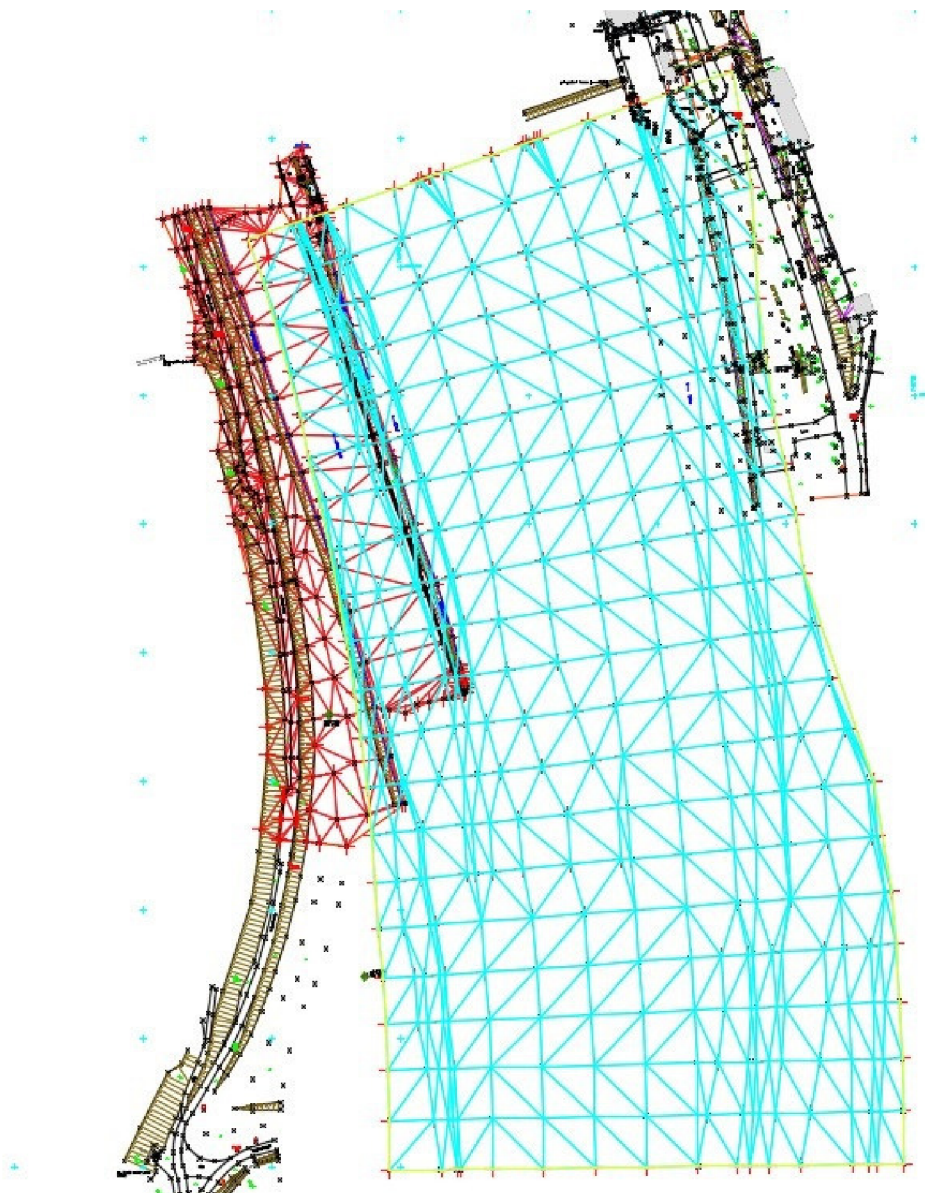


Obrázek 13 - Export dat do programu Civil 3D

Z takto připravených dat byl již vytvořen povrch v programu Civil 3D (Obrázek 14).

### 5.1.2. Tvorba modelu plavebního kanálu

Model plavebního kanálu byl vytvořen z geodeticky zaměřených bodů [B7] v programu Civil 3D. Na následujícím obrázku (Obrázek 14) lze vidět dva TIN povrchy. Modře povrch vlastního koryta a červeně povrch plavebního kanálu. Model byl doplněn o povinné spojnice a vhodně upraven proházením hran.



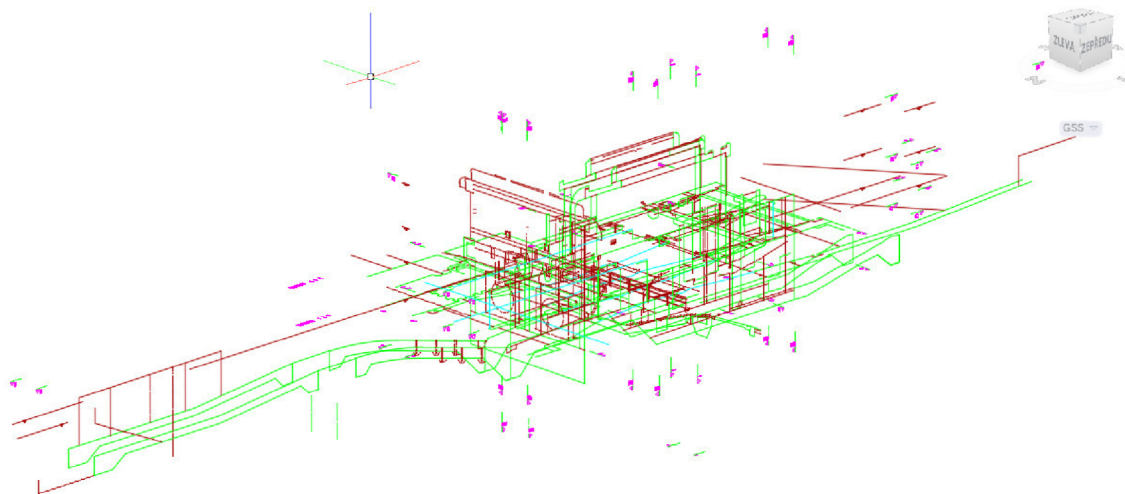
**Obrázek 14 - Vytvoření TIN povrchů v programu Civil 3D. Modře je zobrazen povrch koryta toku a červeně povrch plavební komory.**

Výšky jednotlivých bodů na překrytých površích byly rozdílné. Zaměření dat plavební komory se jevílo jako věrohodnější, a proto bylo využito právě těchto hodnot.

Takto připravená data byla očištěna od nyní již přebytečných čar. Zbylé povrchy byly exportovány do formátu .dxf. Tento formát byl vhodný pro import do modelovacího programu Blender, s jehož pomocí byly prováděny veškeré následné úpravy modelu.

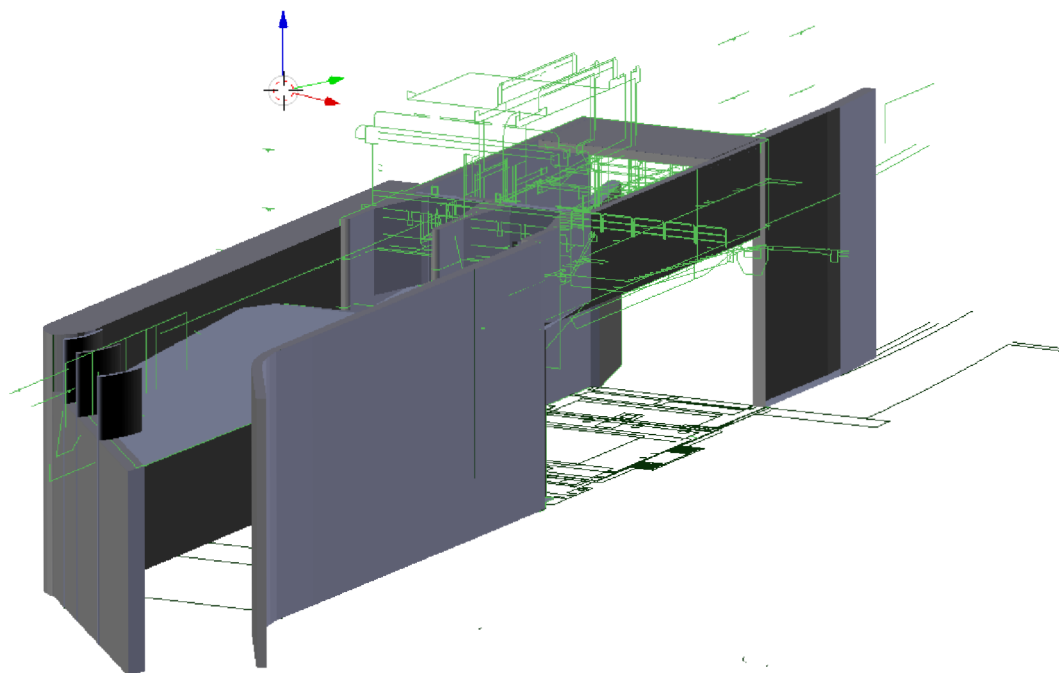
### 5.1.3. Vytvoření nátoků na stávající MVE Klecany I

Stávající nátok na Klecany I byl zpracován dle projektové dokumentace [B1], [B2]. Výkresy byly promazány a řezy složeny na jejich příslušná místa určení (Obrázek 15).



**Obrázek 15 - Podklad připravený v Civil 3D pro export do programu Blender**

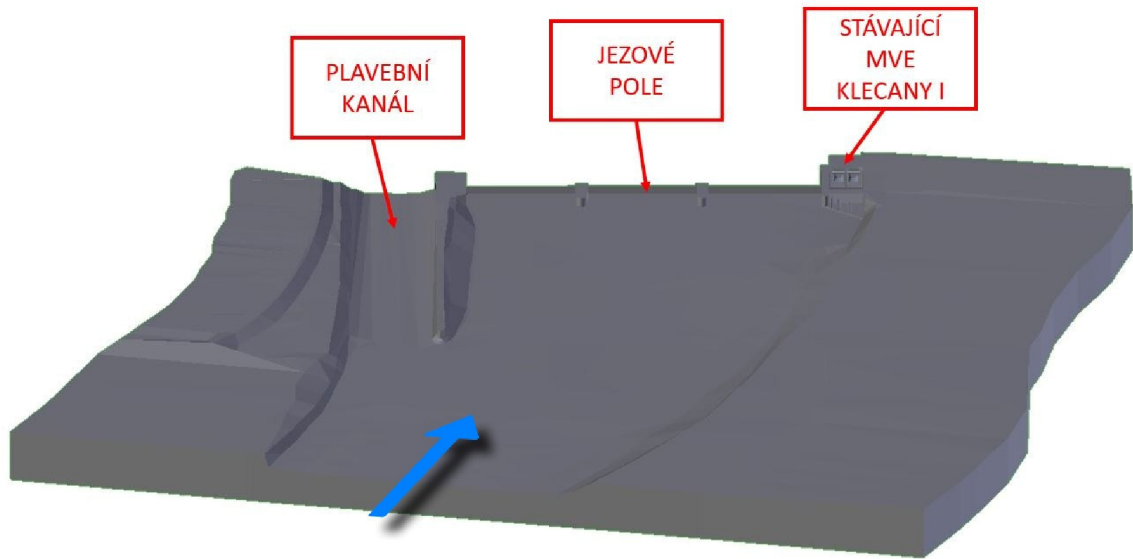
K modelování bylo využito jak příčných a podélných řezů [B2], tak půdorysů [B1]. Tyto následně posloužily jako podklad pro modelování jinak složitějších tvarů nosných konstrukcí (Obrázek 16).



**Obrázek 16 - Obrázek z prostředí Blender ve fázi modelování**



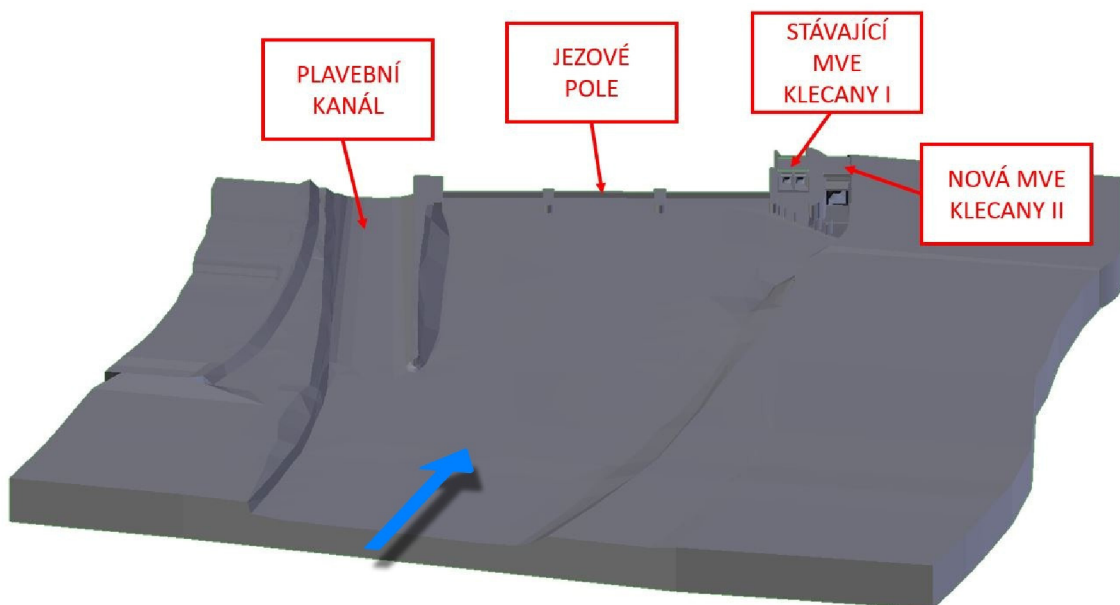
Na následujícím obrázku (Obrázek 17) je zobrazen finální výpočtový model. Jednotlivé části zdymadla jsou popsány a modře je vyznačen směr proudění vody.



Obrázek 17 - Vytvořený výpočtový model stávajícího stavu (bez MVE Klecany II)

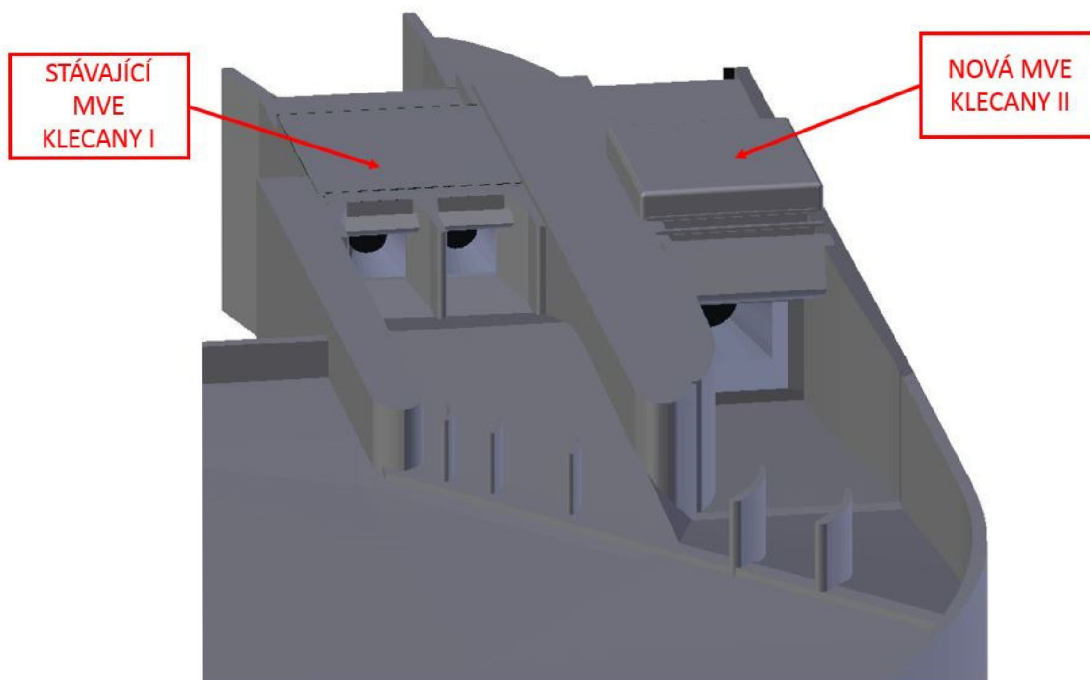
## 5.2. Model plánovaného stavu

Již vytvořený model z předchozí kapitoly byl doplněn o novou elektrárnu Klecany II z výkresové dokumentace [B3], [B4]. Nátok byl vytvořen shodným postupem, který byl popsán v kapitole 5.1.3.



Obrázek 18 - Vytvořený výpočtový model s novou MVE Klecany II

Detailnější zobrazení obou nátoků na elektrárny včetně dělících pilířů a usměrňovacích pilířů je zachyceno na dalším obrázku (Obrázek 19).



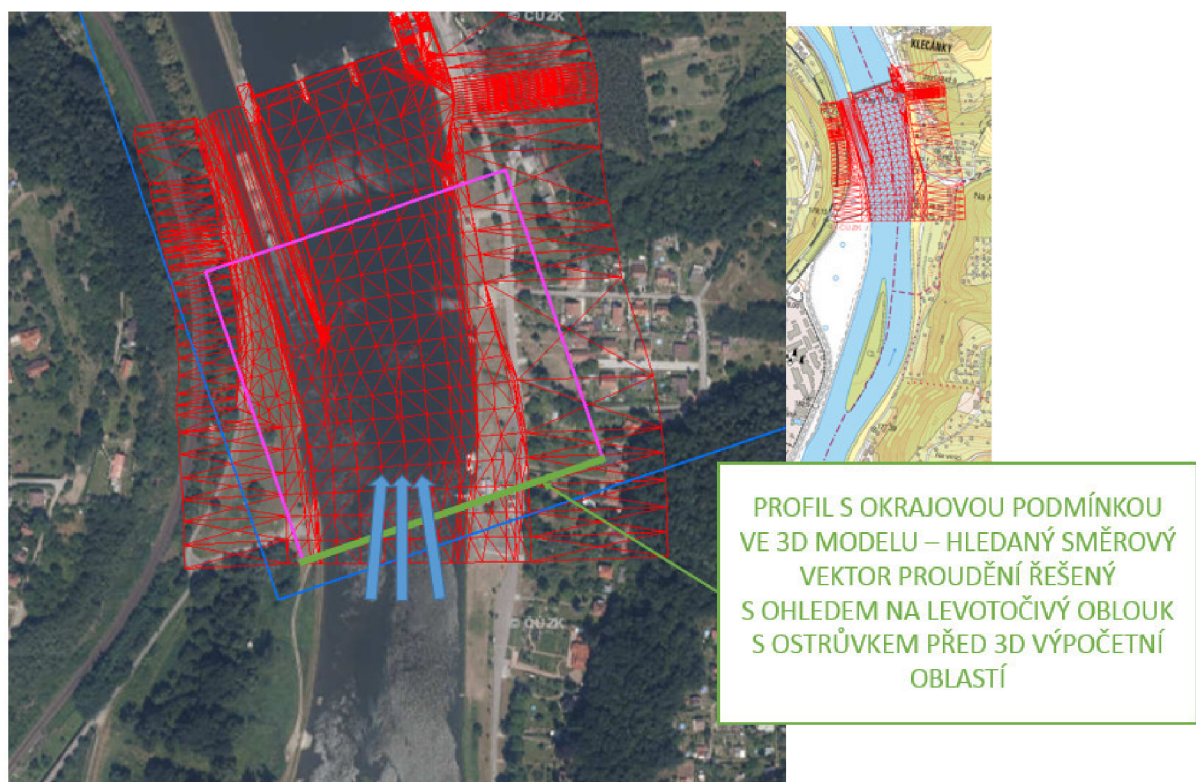
**Obrázek 19 - Detail nátoků na obě MVE**

Takto vytvořené modely byly dostačujícím podkladem pro export do formátu .stl. Tento formát byl vhodný pro import do programu FLOW-3D, ve kterém byl poté proveden hydraulický výpočet 3D proudění (Kap. 8.).

## 6. Tvorba DMT modelu v programu HEC-RAS

Během tvorby 3D výpočtového modelu a při uvažování ohledně zadávání okrajových podmínek před spuštěním vlastního výpočtu v programu FLOW-3D vyplynula na povrch skutečnost o neznalosti směru vektoru proudění v korytě v místě plánovaného zadávání okrajové podmínky (vtok do 3D modelu). Jak lze vidět na následujícím obrázku (Obrázek 20), 3D model je situován v těsné blízkosti za levotočivým obloukem, který je navíc ještě rozdělen ostrůvkem.

Směr vektoru proudění vody má velký vliv na samotný výpočet v programu FLOW-3D. Proto byl vytvořen pomocný DMT v programu HEC-RAS, aby zabezpečil co nejpřesnější řešení následných výpočtů.



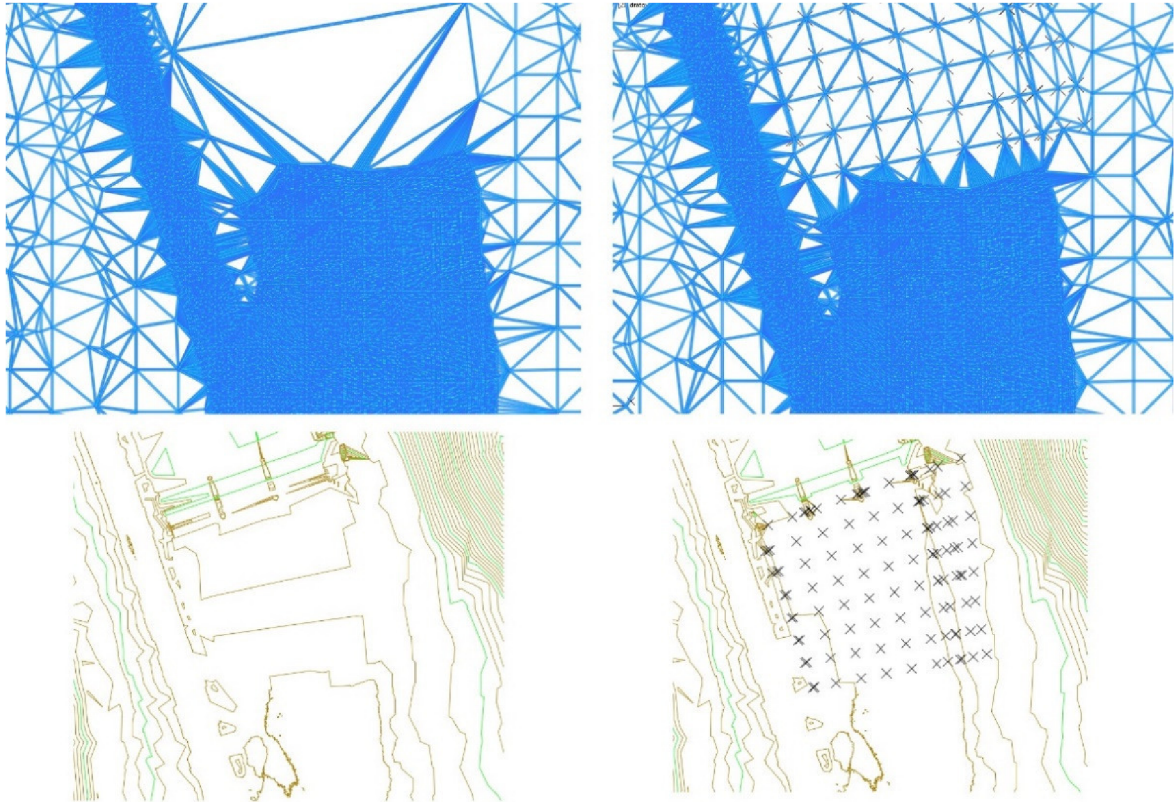
**Obrázek 20 - Hledání okrajové podmínky do 3D výpočtového modelu [C1], [C2]**

(červeně zobrazen 3D model, modře osy pomocného souřadného systému pro 3D model, fialově dílčí mesh s hledaným směrovým vektorem okrajové podmínky)

Jelikož dosavadní získaná data zaměření příčných profilů koryta nebyla pro DMT dostačující, neboť k dispozici byl pouze úsek nezbytně nutný pro 3D model v kilometrůžce 37,50 až 37,10 (Obrázek 12), bylo nutné dodatečně požádat Povodí Vltavy, s.p. o doplnění zaměření koryta toku v úseku od 40. říčního kilometru až k samotnému jezu.

Na základě žádosti státní podnik poskytl pro zpracování této diplomové práce naskenovaná data dna koryta toku ve formátu .dwg [B8]. Získaný naskenovaný úsek měřil přibližně 2,5 kilometru.

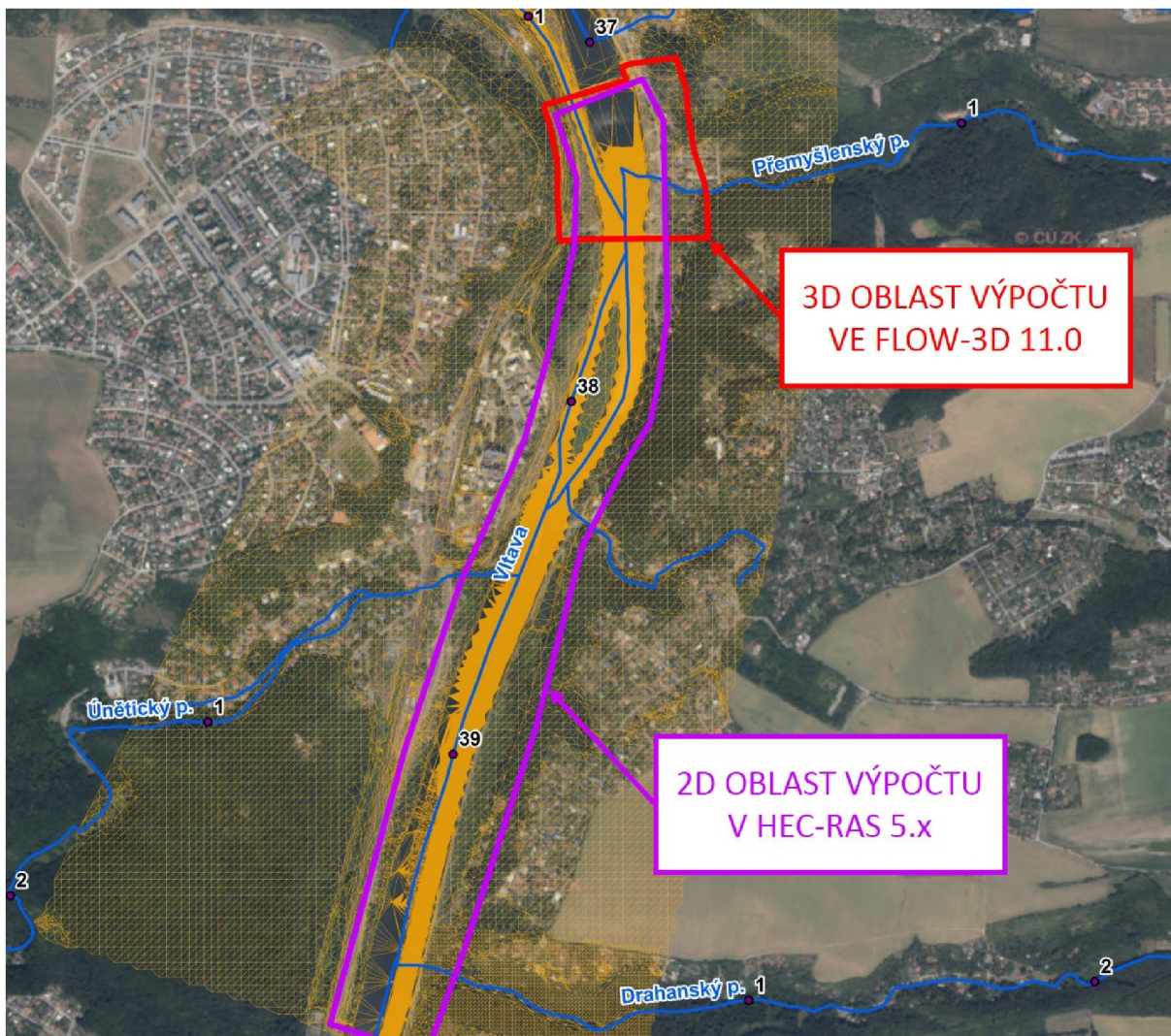
Jak si lze na následujícím obrázku všimnout (Obrázek 21), skenování dna nadjezí nebylo dostatečné, proto bylo nutné je doplnit o data zaměřených příčných profilů [B6], které byly použity pro tvorbu 3D modelu. Kombinací těchto dat byl vytvořen v programu CIVIL 3D TIN povrch (Obrázek 21).



**Obrázek 21 - Doplnění naskenovaného reliéfu dna zaměřenými příčnými profily  
(vlevo stav před doplněním zaměřených profilů, vpravo opravený povrch,  
modře zobrazen TIN, barevně zobrazeny vrstevnice po 1 m)**

Takto připravený TIN povrch bylo poté možno vyexportovat do rastrového formátu .geotiff, který byl nositelem geometrický dat a byl vhodný pro import do programu HEC-RAS. Rastr byl vytvořen s velikostí pixelu 1×1 m.

Na následujícím obrázku (Obrázek 22) jsou zobrazeny pro lepší přehlednost a orientaci obě výpočtové oblasti. Fialově je zobrazena oblast, ve které byl proveden výpočet 2D proudění pomocí programu HEC-RAS. Červeně je zbarvena oblast zdyhadla Klecany-Roztoky, kde bylo simulováno proudění variantou 3D v programu FLOW-3D. Na podkladové ortofotomapě je ještě oranžově vyznačen reliéf naskenovaného dna koryta toku v kombinaci s 5G modelem, které pro zpracování práce poskytlo Povodí Vltavy, s.p.



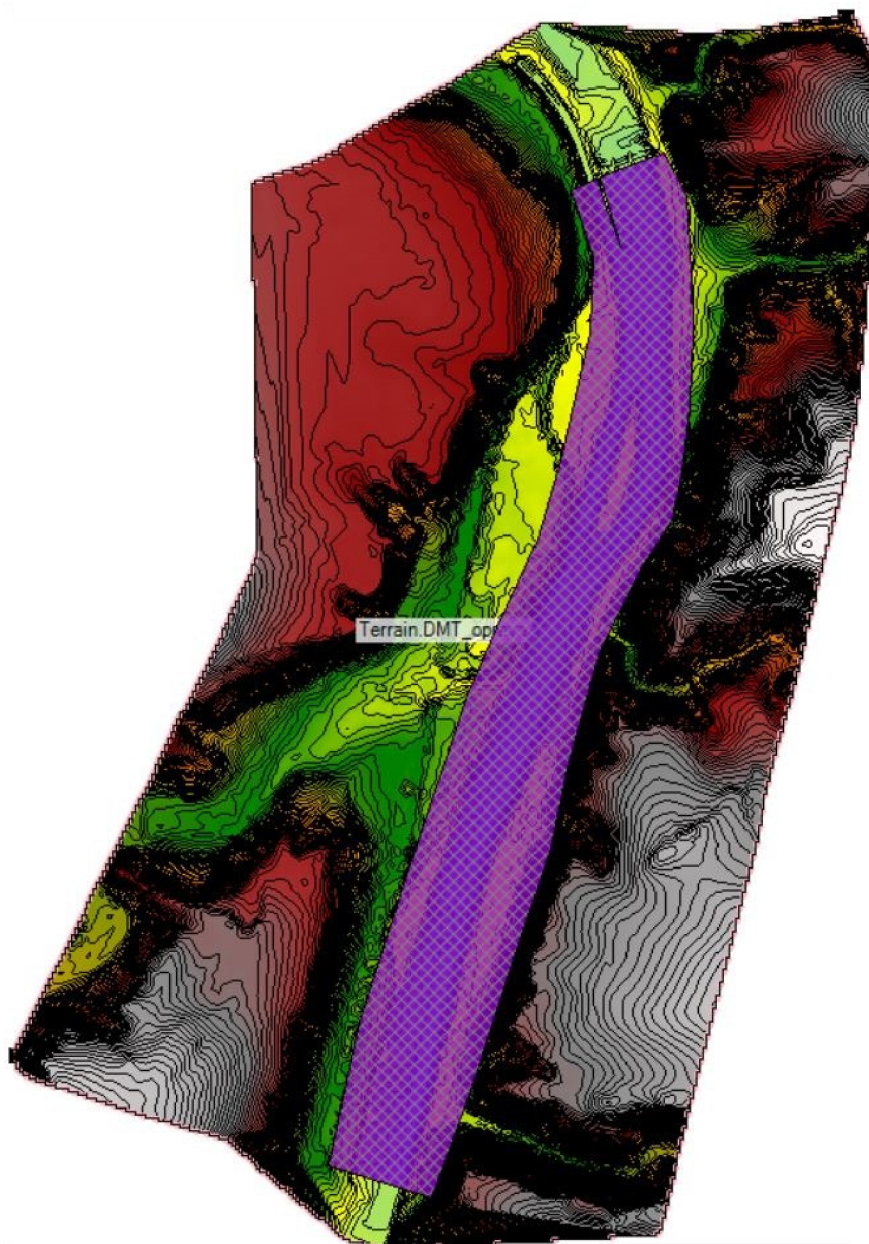
Obrázek 22 - Zobrazení 2D a 3D výpočtních oblastí [C1], [C3]

## 7. Výpočet v programu HEC-RAS

Tato kapitola se zabývá 2D matematickým modelováním ve výpočetním programu HEC-RAS. Jak již bylo vysvětleno, 2D modelováním byl zjištěn směr převládajícího vektoru proudění vody v korytě, který byl následně zadán jako okrajová podmínka do 3D modelu. Výpočet byl řešen jako ustálená úloha.

### 7.1. Nastavení výpočtu

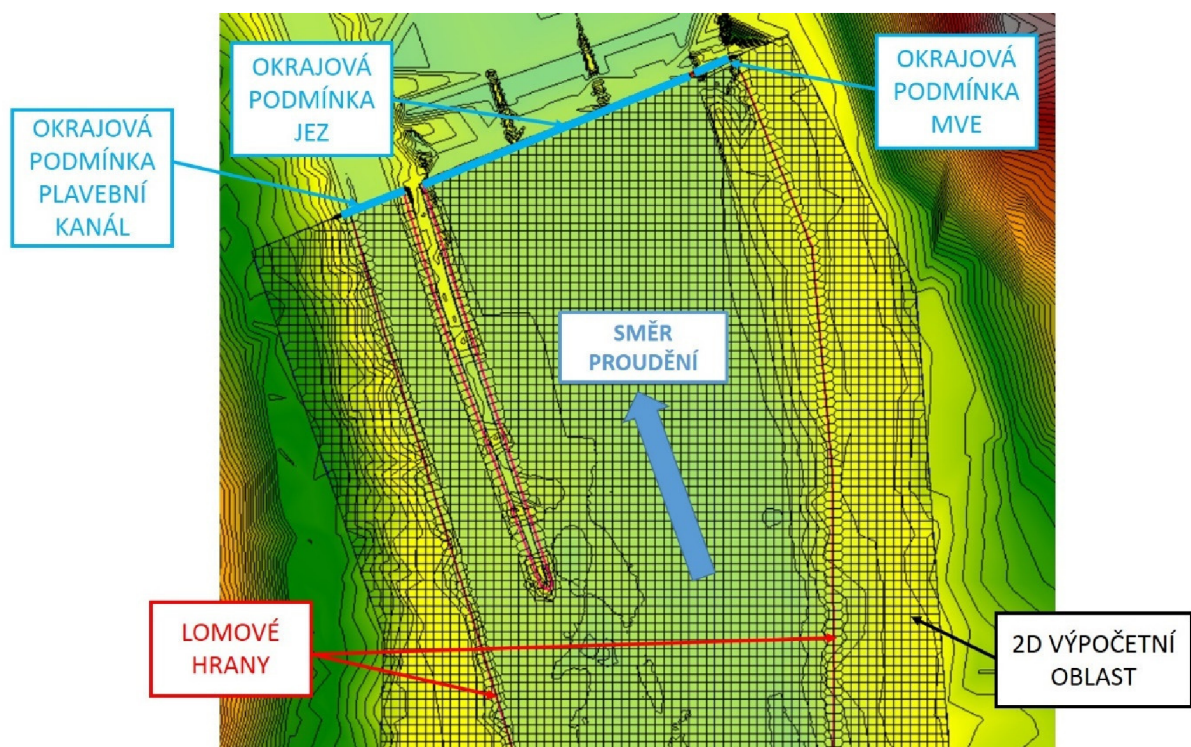
Jak již bylo zmíněno, import geometrických dat byl proveden formou rastru s příponou .geotiff (Obrázek 23).



Obrázek 23 - Naimportovaný rastr v programu HEC-RAS se zadanou 2D výpočtovou oblastí (fialově)

Do nahrané geometrie byly vyneseny pomocné lomové hrany, které byly umístěny do břehových linií. Na základě těchto hran se poté vygeneroval výpočtový mesh s buňkami o velikosti  $3 \times 3$  m s celkovým počtem přibližně 85 tisíc. Do takto připravené 2D výpočetní plochy bylo potřeba zadat počáteční a okrajové podmínky. Jako počáteční podmínka byla zadána hodnota výšky hladiny po celé oblasti na úroveň 175,00 m n. m., která odpovídá trvalému vzduť hladiny od jezu do průtoku až  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  (podrobněji Kap. 8.1.).

Okrajová podmínka na nátoku byla zadána flow hydrograph (závislost průtoku v čase) a konstantně v čase byla nastavena na hodnotu  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Okrajová podmínka na konci úseku byla rozdělena na úsek plavebního kanálu, jezu a MVE (Obrázek 24).

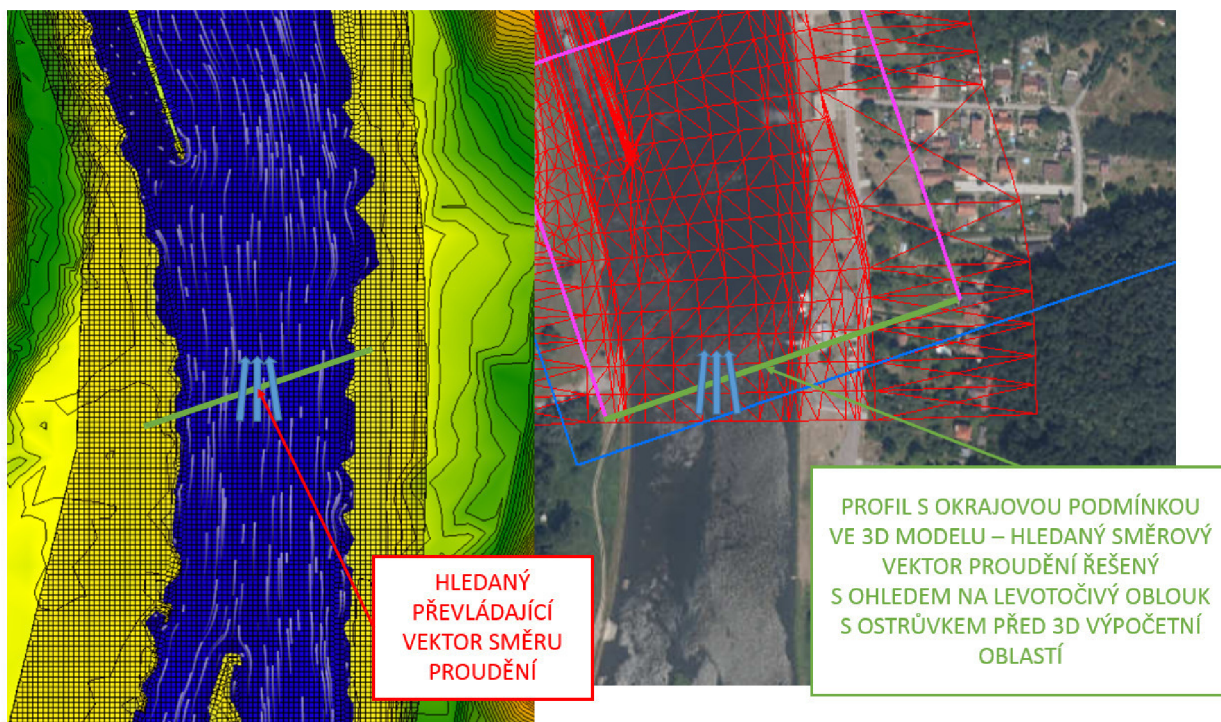


Obrázek 24 - Nastavení výpočtu v programu HEC-RAS

Okrajová podmínka plavebního kanálu a MVE byla zadána jako rating curve (závislost průtoku na výšce hladiny). Pro zajištění správné výšky hladiny (tj. 175,00 m n. m.), byla pro jez zvolena okrajová podmínka stage hydrograph (pevně nastavená výška, při které odtéká voda). Prerozdělení průtoků bylo shodné jako ve variantě stávajícího stavu při výpočtu 3D proudění (Obrázek 28).

## 7.2. Výsledek výpočtu

Na základě výpočtu bylo možné určit převládající směr vektoru proudění vody a použít jej jako okrajovou podmínku do 3D výpočetního modelu v programu FLOW-3D.

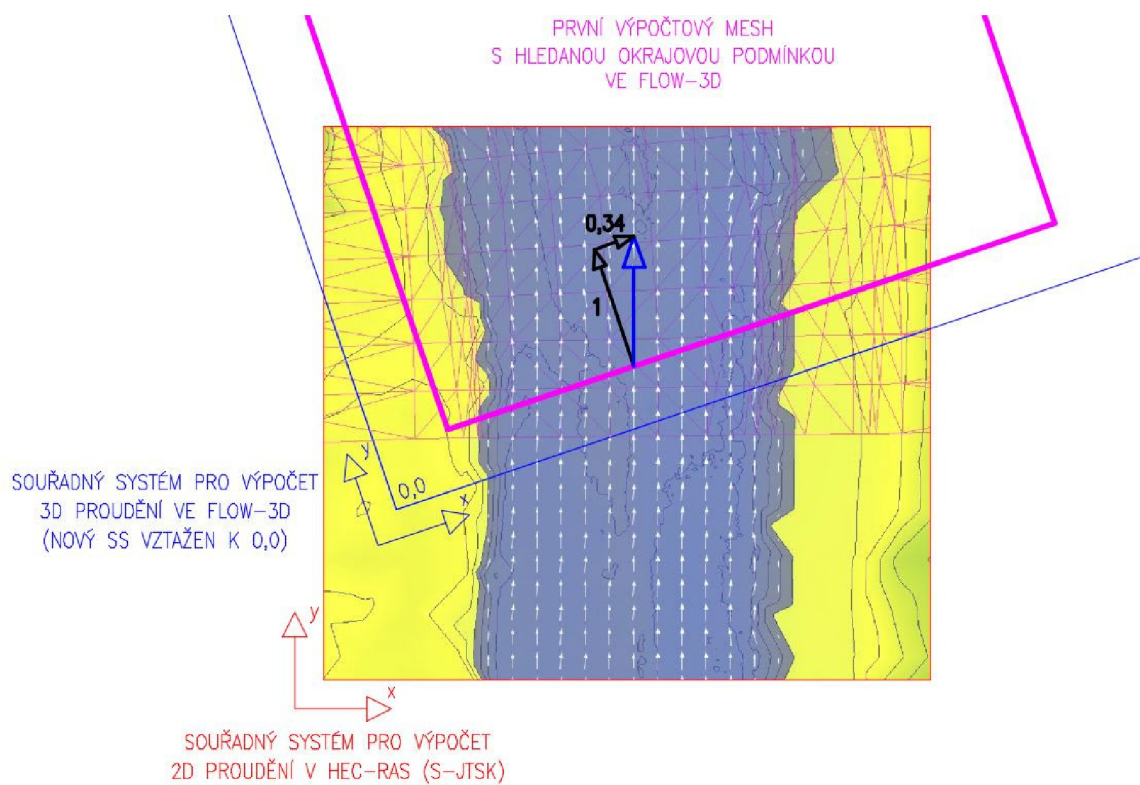


Obrázek 25 - Hledaný směr vektoru proudění vody v korytě [C1], [C3]

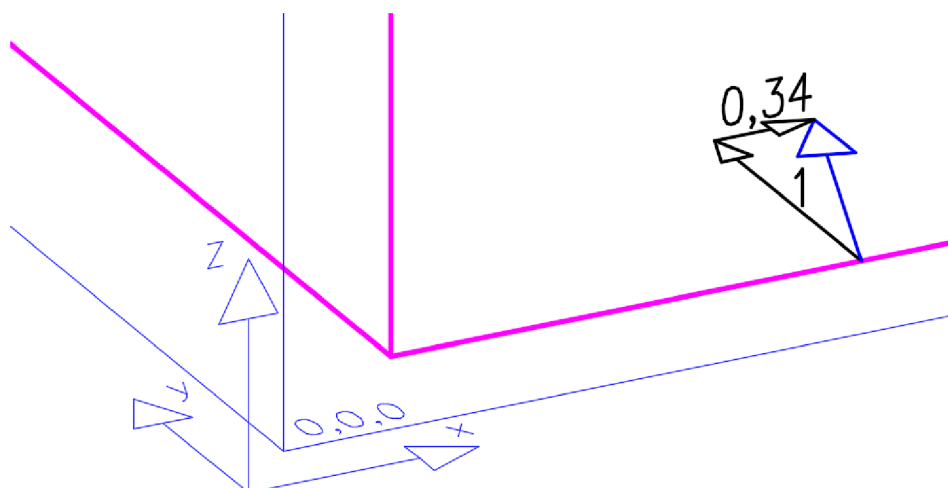
Pro lepší pochopení provázanosti 2D a 3D modelu a jejich souřadných systémů (SS) slouží následující obrázek (Obrázek 26). 2D výpočetní model v programu HEC-RAS zůstal na původních souřadnicích v S-JTSK (červeně). Naopak pro 3D model v programu FLOW-3D byl zvolen lokální souřadný systém (modře), který zajistil jednodušší práci jak při nastavení modelu, tak později i snadnější a přehlednější zpracování výsledků.

Dále je na obrázku (Obrázek 26) zobrazen výpočtový mesh 3D modelu (fialově), do kterého byla zadána okrajová podmínka na základě pomocného 2D výpočtu v programu HEC-RAS. Směrový vektor byl tedy zastoupen hodnotou  $x = 0,34$  a  $y = 1$  (černě), vertikální složka proudění byla zvolena jako 0, tj. že k vertikálnímu proudění v tomto úseku nedochází (zjednodušující předpoklad).





Obrázek 26 - Souřadné systémy 2D a 3D modelu s určením směru vektoru okrajové podmínky



Obrázek 27 - Směrový vektor okrajové podmínky v axonometrii

## 8. Výpočet v programu FLOW-3D

Tato kapitola se zabývá modelováním proudění povrchové vody s využitím programu FLOW-3D a je rozdělena na dvě hlavní části. V první části byl výpočet zaměřen na posouzení možného ovlivnění plavby vlivem výstavby MVE Klecany II ke stávající MVE Klecany I. Druhá část se věnuje posouzení tvaru nátoků na MVE Klecany II.

Předpoklady výpočtu byly následující:

- ustálený stav,
- nestlačitelná kapalina,
- izotermický děj,
- turbulentní proudění.

V neposlední řadě bylo při výpočtu předpokládáno, že vlastní koryto a prostor jezu není zanesen sedimenty.

### 8.1. Výpočet pro posouzení splavnosti

Jedním z cílů práce bylo posoudit vliv příčných rychlostí na lodě, které budou plavební cestu využívat. Vlivem výstavby nové MVE Klecany II se předpokládá zvýšení těchto negativních okolností na plavbu důsledkem vtahování právě směrem k elektrárnám. Model byl zpracován pro obě varianty. První varianta je aktuální situace, v druhé variantě byl na základě výkresové dokumentace vytvořen model plánovaného stavu.

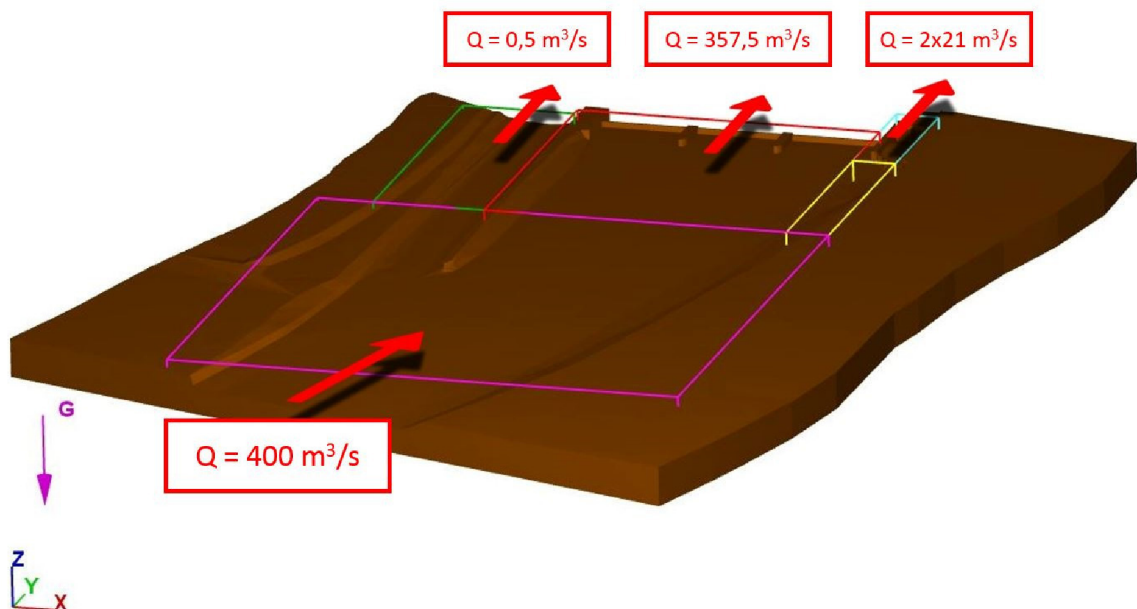
V obou stavech bylo vycházeno z nejhoršího možného scénáře, který může nastat a bude mít největší vliv na tamní plavbu. V manipulačním řádu [A1] je uvedeno, že do průtoku  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  je hladina držena na stálém vzduť 175,00 m n. m. Při tomto průtoku se již uvažuje o odstavení elektrárny z důvodu vzduť dolní vody, a tedy vyrovnáním úrovní hladin (ztráta spádu). Pokud je průtok vyšší, dochází ke snížení hladiny o 0,3 m. Lodní plavba je povolena do průtoku  $Q = 450 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aby mohla být využita informace o stálém držení hladiny, bylo ve výpočtech uvažováno s průtokem  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  společně s držením vzduť hladiny na již zmiňované úrovni 175,00 m n. n. Dále následovala úvaha o možné situaci přerozdělení průtoku do prostoru plavebního kanálu, jezu a MVE. Při výpočtech se vycházelo z předpokladu, že nejhorší stav nastane, pokud při výše uvedeném průtoku bude plavební komorou pouštěn pouze sanační průtok a vlastní elektrárna poběží na plný výkon. Ve druhé variantě je vliv proudění směrem k nátokům ovlivněn právě výstavbou druhé MVE Klecany II s tím rozdílem, že přes jez přepadá průtok, který je snížen právě o hodnotu hltnosti nové PIT turbíny ( $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Na obrázcích níže (Obrázek 28, Obrázek 32) jsou obě tyto varianty graficky zobrazeny.

Výpočet byl proveden v programu FLOW-3D. V následujících kapitolách byly jednotlivé modely popsány s ohledem na přerozdělení průtoků a veškerých ostatních pro výpočet nezbytných nastavení.

### 8.1.1. Varianta stávajícího stavu

Jak již bylo zmíněno, jednalo se o simulaci stávající situace. V programu FLOW-3D byla řešená oblast rozdělena na určitý počet výpočtových sítí, tzv. meshů. Mesh je dílčí výpočetní blok, kterému se zadávají okrajové podmínky a příslušný počet výpočetních buněk.

Aby bylo možné co nejpřesněji vystihnout přerozdělení průtoků na plavební komoru, vlastní jezové pole a MVE, bylo nutné stávající model rozdělit na 5 částí (meshů). Na následujícím obrázku (Obrázek 28) lze vidět, jak takové rozdělení vypadá.



Obrázek 28 - Rozdělení na výpočtové meshe v programu FLOW-3D (stávající varianta)

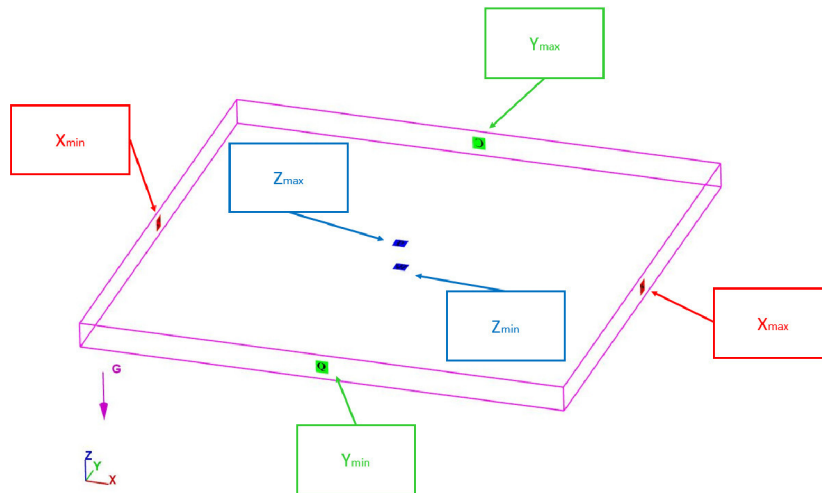
Nastavení okrajových podmínek bylo nutné u všech dílčích výpočtových sítí pro každou stěnu ve směrech  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  s ohledem na osy souřadného systému. Kladný směr osy určuje podmínku maximální, záporný kvadrant jako minimální. V programu FLOW-3D jsou určeny jako (Obrázek 29):

- $X_{\min}$
- $X_{\max}$
- $Y_{\min}$
- $Y_{\max}$

- $Z_{min}$
- $Z_{max}$

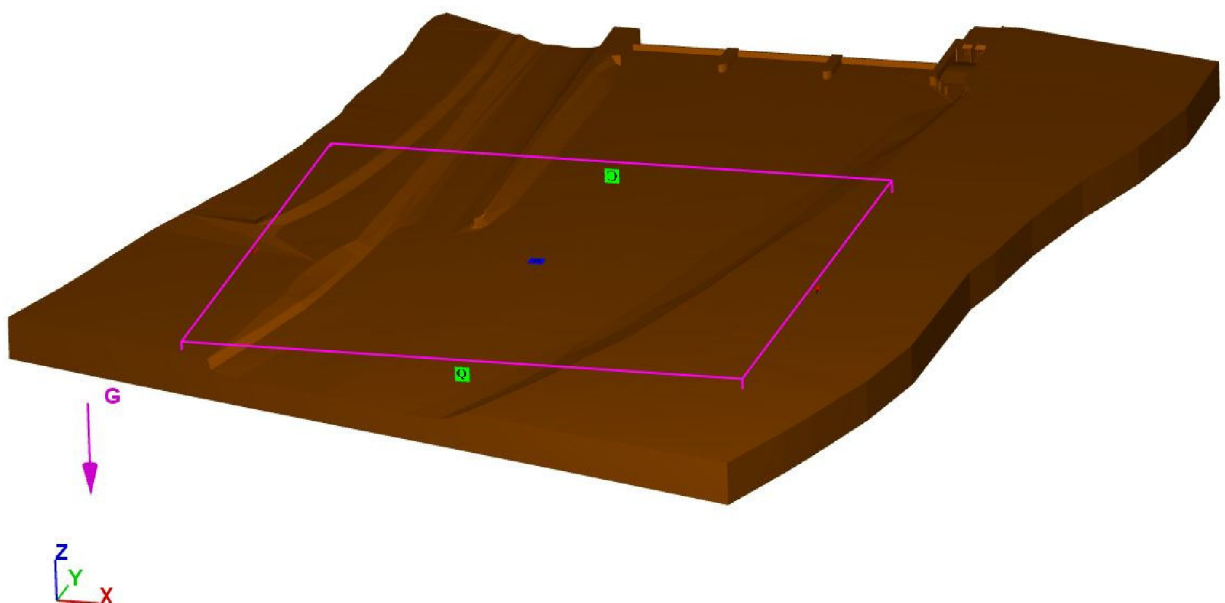
Spektrum nastavení okrajových podmínek je široké, aby bylo možné vystihnout co nejlépe simulovaný děj. Níže jsou popsány některé z nich, které byly při výpočtu používány.

Pro lepší orientaci v problematice byla prvnímu úseku věnována větší pozornost a bylo vytvořeno schéma, které nastavení lépe zobrazuje (Obrázek 29).



Obrázek 29 - Schematizace nastavení okrajových podmínek v programu FLOW-3D

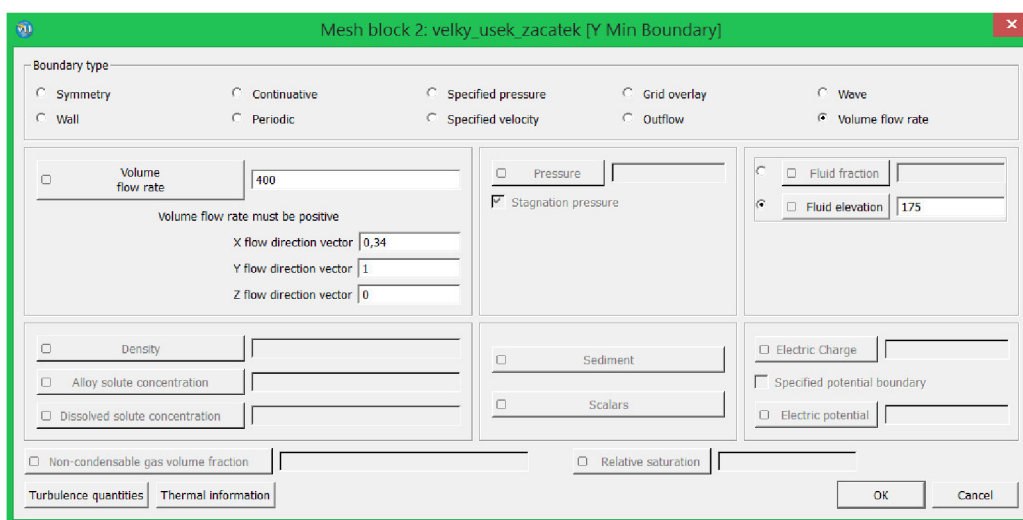
První mesh po směru proudění (fialový) je největší (Obrázek 30). Jedná se o síť, která musela pokrýt celou šířku průtočného profilu, aby bylo možné zadat vstupní hodnotu průtoku korytem.



Obrázek 30 - Výpočtový mesh s okrajovými podmínkami v programu FLOW-3D

V místech, kde byla stěna meshe překryta 3D modelem terénu, bylo možné použít okrajovou podmínku zeď (W – Wall) se zadáním rychlosti vody na povrchu modelu rovnou 0 m/s. V tomto případě tomu tak bylo v  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  a  $Z_{\min}$ , tzn., že okrajová podmínka nebyla aktivní a respektovala tvar vloženého 3D modelu. Na ploše  $Z_{\max}$  byla nastavena okrajová podmínka atmosférického tlaku (P – Pressure).

Ve směru Y bylo pracováno s vlastním zadaným průtokem a vektorem rychlosti, proto byla zvolena podmínka Volume flow rate (Vfr), která umožňovala tyto informace zadat. Na následujícím obrázku (Obrázek 31) je zobrazeno nastavení okrajové podmínky  $Y_{\min}$  včetně pevně zadané výšky hladiny na hodnotu 175,00 m n. m. Tuto výšku bylo možné zadat díky vzduší jezu, které dosahuje až na začátek oblasti, jak bylo ověřeno pomocí 2D modelu v HEC-RASu (Kap. 6).

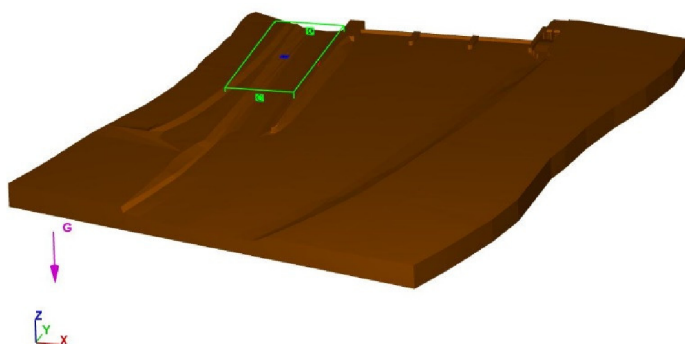


Obrázek 31 - Nastavení okrajových podmínek v programu FLOW-3D pro první (fialový) výpočtový mesh

Zbývající plocha reprezentující  $Y_{\max}$  byla nastavena jako následný přechod do další výpočtové jednotky (C – Continuative). Touto podmínkou bylo zajištěno pokračování ve výpočtu dále po směru toku.

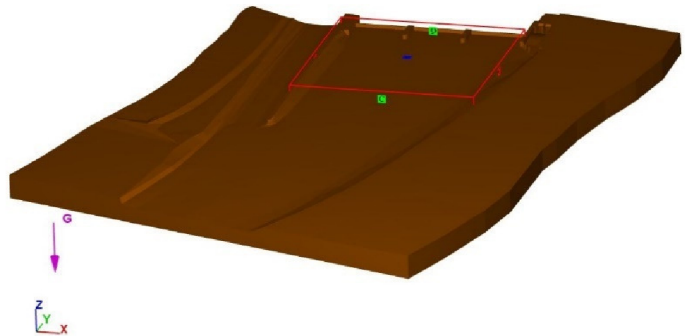
Druhý mesh (zelený) se týkal plavebního kanálu a byl nastaven následovně:

- $X_{\min}$  – W (Wall)
- $X_{\max}$  – C (Continuative)
- $Y_{\min}$  – C (Continuative)
- $Y_{\max}$  – Vfr (Volume flow rate)
- $Z_{\min}$  – W (Wall)
- $Z_{\max}$  – P (Pressure)



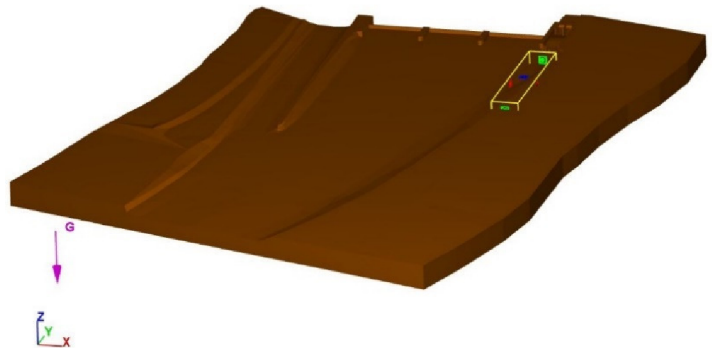
Třetí mesh (červený) reprezentoval oblast jezových polí a zároveň spojoval všechny výpočtové jednotky.

- $X_{\min}$  – C (Continuative)
- $X_{\max}$  – C (Continuative)
- $Y_{\min}$  – C (Continuative)
- $Y_{\max}$  – Vfr (Volume flow rate)
- $Z_{\min}$  – W (Wall)
- $Z_{\max}$  – P (Pressure)



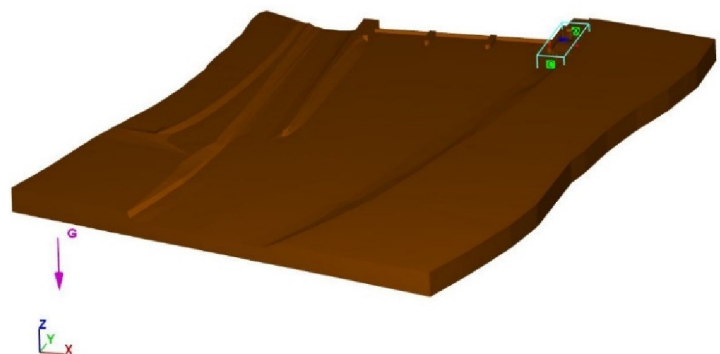
Čtvrtý mesh (žlutý) byl umístěn v prostoru před nátokem na MVE.

- $X_{\min}$  – C (Continuative)
- $X_{\max}$  – W (Wall)
- $Y_{\min}$  – C (Continuative)
- $Y_{\max}$  – C (Continuative)
- $Z_{\min}$  – W (Wall)
- $Z_{\max}$  – P (Pressure)



Poslední mesh (světle modrý) byl situován přímo v nátoku na MVE.

- $X_{\min}$  – C (Continuative)
- $X_{\max}$  – W (Wall)
- $Y_{\min}$  – C (Continuative)
- $Y_{\max}$  – Vfr (Volume flow rate)
- $Z_{\min}$  – W (Wall)
- $Z_{\max}$  – P (Pressure)



Každá výpočtová síť musela být rozdělena na určitý počet prvků o zvolených velikostech. Způsoby zadání rozměrů buněk byly dva. První variantou bylo nastavení počtu buněk v daném bloku. Zde však mohl být problém na hranicích přechodů jednotlivých bloků důsledkem různých velikostí výpočtových buněk a výpočet mohl být nestabilní. Pokud bychom zvolili tento způsob zadávání, bylo by potřeba předem spočítat, jak velké prvky dostaneme a nastavit jednotlivé počty komplexně ve všech sítích.

Druhá, jednodušší možnost, umožňovala přímé zadání velikostí buněk a větší šanci na stabilní výpočet. Nevýhodou však může být při složitějších modelech s různými velikostmi výpočtových sítí konečný počet buněk, který může výrazně prodlužovat dobu a složitost výpočtu.

V této variantě výpočtu byl nastaven pevný rozměr buňky na hodnotu 0,4 m, tj. model obsahoval přibližně 10,1 milionů buněk. Drsnost povrchu byla zvolena 0,025. Jako počáteční podmínka byla nastavena hydrostatická hladina do úrovně 175 m n. m.

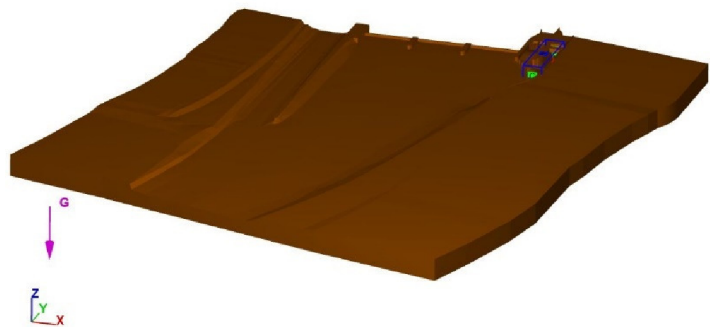
Z důvodu téměř neproudícího plavebního kanálu (simulovaný nejhorší stav s uzavřenými vraty do plavební komory s pouze sanačním průtokem 0,5 m<sup>3</sup>/s) byl výpočet nastaven na délku simulace až 3000 sekund. Tato délka měla zajistit dostatečné ustálení proudění a objektivnost požadovaných výsledků.

### 8.1.2. Stav po výstavbě MVE Klecany II

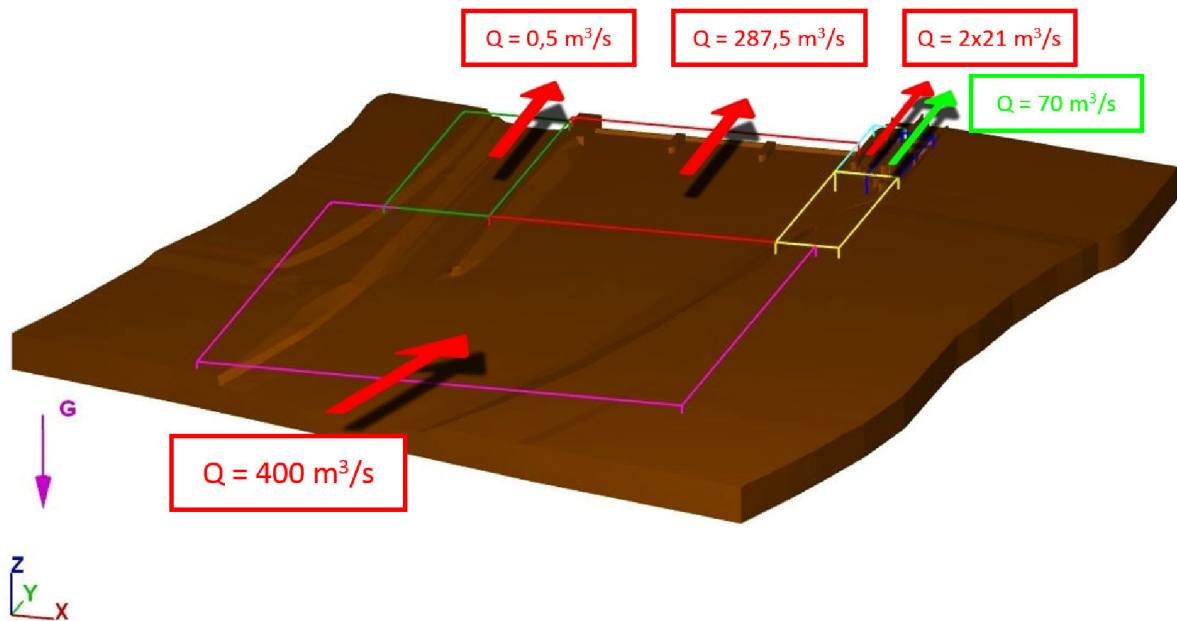
Nastavení druhého modelu bylo nutné upravit. Na obrázku je vidět, že ke stávajícím pěti výpočtovým sítím byla přidána šestá (tmavě modrá), která byla umístěna do prostoru nátoky nové MVE. Tímto rozdělením bylo možné každé ploše okrajové podmínky zadat příslušnou hodnotu průtoku dle hltností jednotlivých turbín.

Nastavení okrajových podmínek v bloku na nátoky nové MVE (tmavě modrá) bylo následující:

- $X_{\min}$  – C (Continuative)
- $X_{\max}$  – W (Wall)
- $Y_{\min}$  – C (Continuative)
- $Y_{\max}$  – Vfr (Volume flow rate)
- $Z_{\min}$  – W (Wall)
- $Z_{\max}$  – P (Pressure)



Dále bylo potřeba upravit rozměr bloku (žlutého) před nátoky ve směru  $X$  a upravit okrajovou podmínku stávajícího nátoky (světle modrý) z Wall na Continuative, aby výpočet pokračoval do bloku nového.



Obrázek 32 - Rozdělení na výpočtové meshe v programu FLOW-3D (plánovaná varianta)

Novému bloku, který simuloval hltnost PIT turbíny, byla zadána okrajová podmínka Volume flow rate s hodnotou průtoku  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ . O tuto hodnotu byl snížen průtok přes jezovou konstrukci, aby byla zachována podmínka, že přítok je roven odtoku.

Velikost výpočtových buněk byla zvolena opět  $0,4 \text{ m}$  s celkovým počtem přibližně 11 miliónů. Drsnost povrchu byla zvolena  $0,025$ . Počáteční podmínka a délka simulace byla shodná s variantou simulace stávajícího stavu.

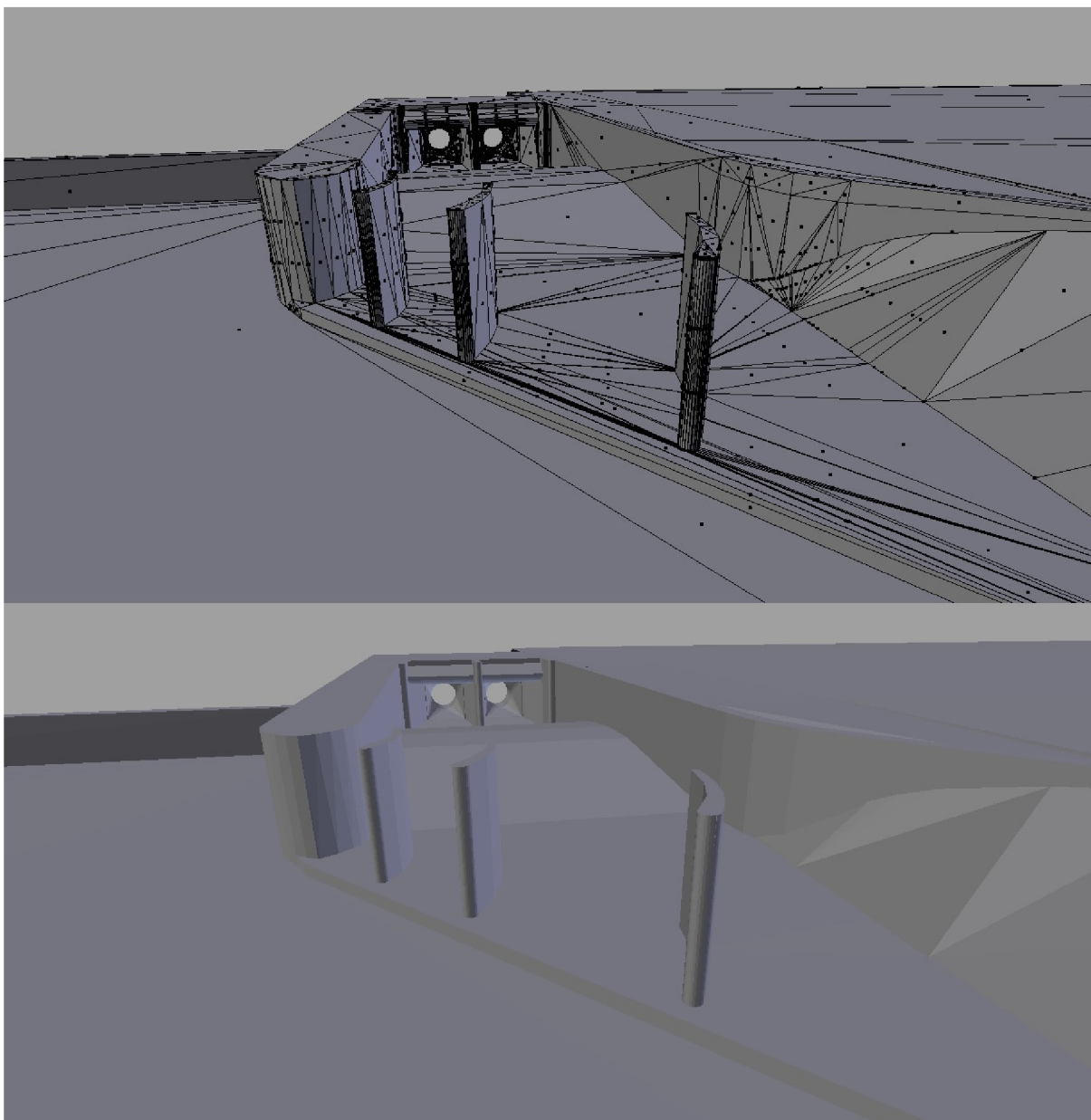
## 8.2. Výpočet pro posouzení tvaru nátoku na MVE Klecany II

Dalším požadavkem a cílem práce bylo posouzení vhodnosti návrhu tvaru nátoku nové MVE Klecany II. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny nátoky stávajícího (Obrázek 33) a navrženého stavu (Obrázek 34). Jak si lze všimnout, po konstrukční stránce je řešen hydraulicky vhodným nátokovým pilířem, který byl navržen v letech 1999 pomocí 2D modelování (Kap. 4.1.3). Cílem práce bylo tedy zhodnocení nového návrhu s ohledem na rovnoměrné rozložení rychlostního pole přitékající vody na turbíny a dále posouzení tvaru nového dělícího pilíře mezi elektrárnami.

Při realizaci stávajícího nátoku byly vystavěny tři usměrňovací křídla, která slouží právě k eliminaci odtrhávání proudící vody od dělícího pilíře. Nová varianta opět počítá s výstavbou těchto pilířů. Pilíře byly navrženy v počtu dvou a už podle obrázku (Obrázek 34) je patrné, že jejich profil je masivnější než u stávající varianty. Dále byl upraven nátokový práh, kdy došlo k jeho mírnému předsazení a prodloužení až k nové zdi, která tvoří nátok. S výstavbou dojde také



k upravení dna před nátokovým prahem. Bližší informace ohledně nátoků byly uvedeny v předchozích kapitolách (Kap. 4.1.3 a 4.1.4)

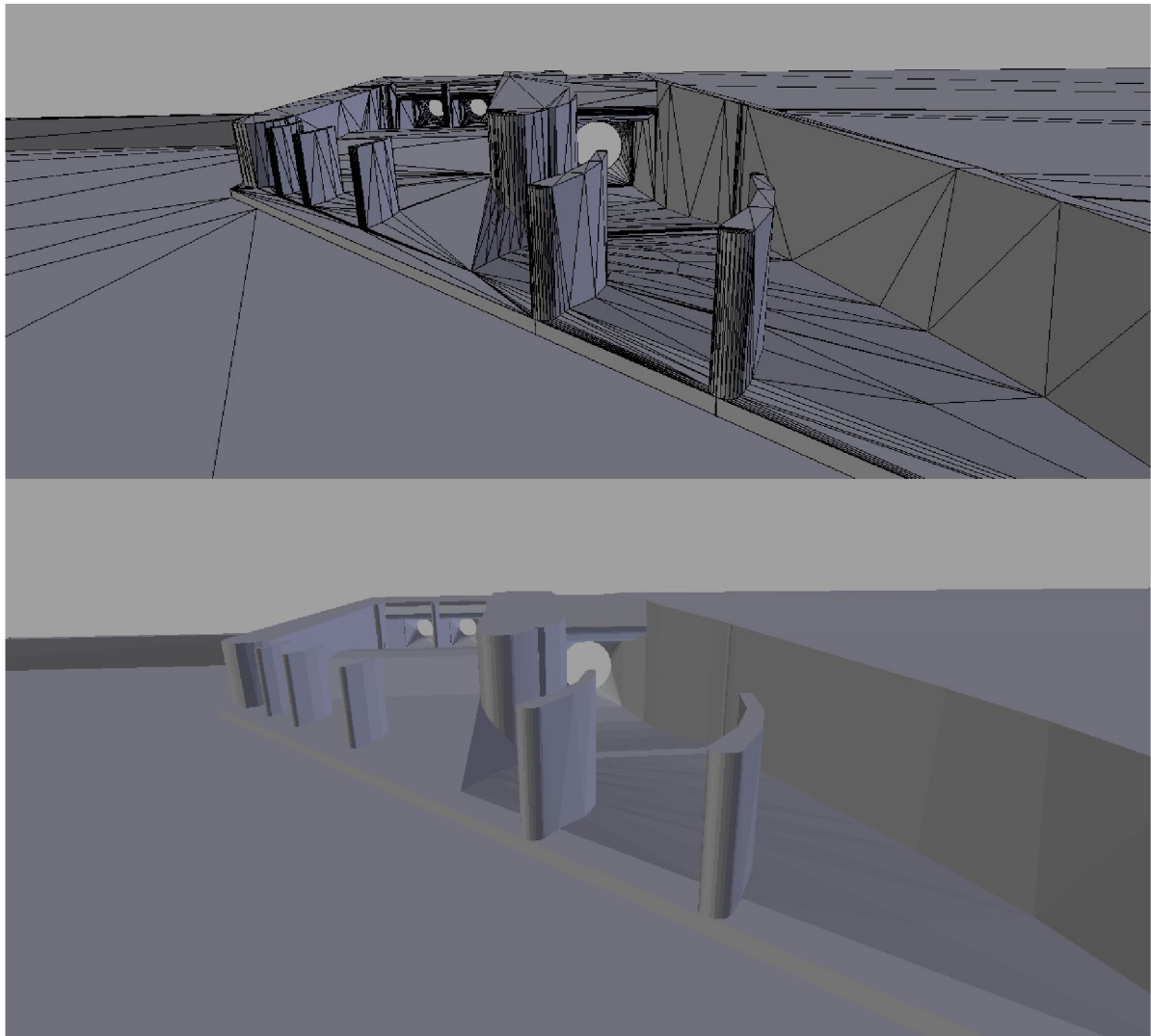


**Obrázek 33 - Stávající stav v Blenderu po exportu do formátu .stl (nahore editační mód, dole objektový mód)**

Modelování stávající varianty posloužilo jako kontrolní, kdy výpočet směru proudnic by měl být podobný jako výsledky z 2D modelu. Důsledkem odlišnosti zvolených typů modelů a nastavení různých okrajových podmínek (jiný modelovaný zatěžovací stav) lze předpokládat odlišnost výsledků.

V druhé fázi byl připraven model důležitější, tedy model nově navrhované varianty. U obou variant byl problém s nastavením okrajové podmínky, neboť meshe v programu FLOW-3D umožňují umístit okrajovou podmínku pouze do celé plochy výpočetního bloku. Z tohoto důvodu

bylo nutné pro oba výpočty modelovat i část jezové zdrže, kam bylo možné již reprezentativně okrajovou podmínku zadat.



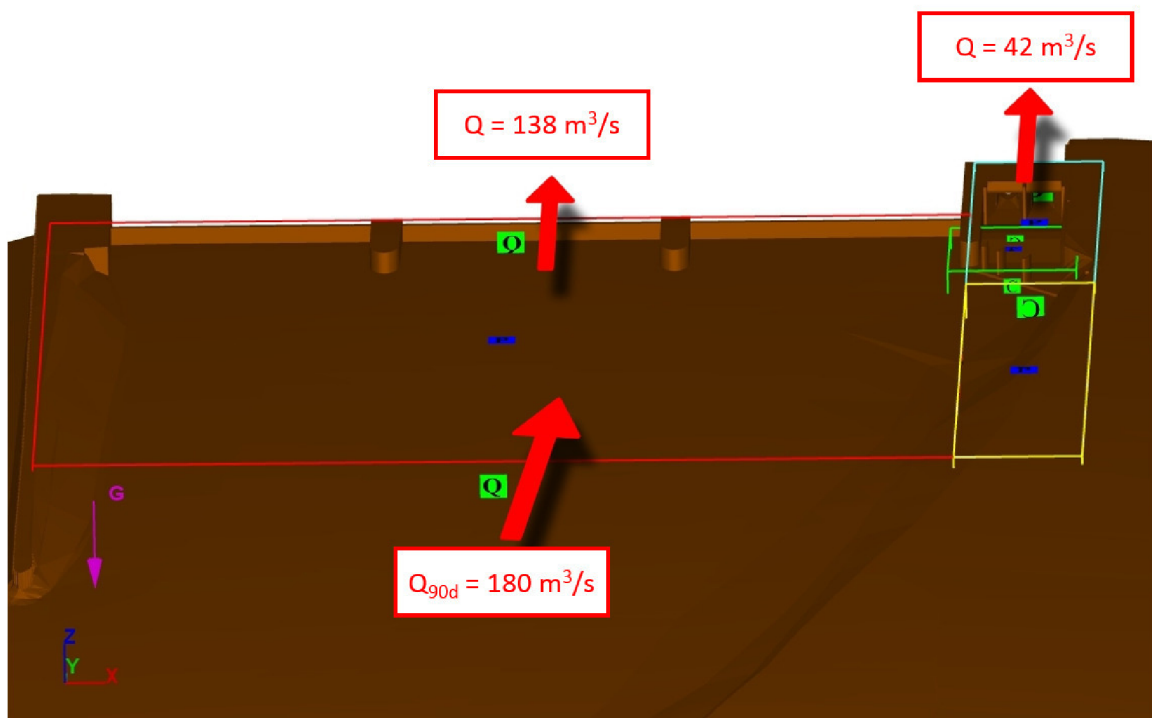
**Obrázek 34 - Plánovaný stav v Blenderu po exportu do formátu .stl (nahore editační mód, dole objektový mód)**

Nastavení výpočtů bylo převzato z modelů předchozích. Pouze byl zkrácen simulovaný úsek a odebrána oblast plavebního kanálu. V obou variantách byl přidán mesh s jemnější mřížkou, který zabezpečil detailnější výpočet kolem dělících pilířů a usměrňovacích křídel. Tato okolnost však prodloužila výpočetní dobu simulovaného jevu, neboť prudce narostl počet výpočetních elementů.

Pro obecné posouzení vhodnosti navrženého tvaru nátoky by bylo potřeba modelovat několik zátěžových stavů v různých kombinacích souběhu elektráren a turbín. Z důvodu velké časové náročnosti byl pro diplomovou práci zvolen takový stav, který disponuje vysokou četností výskytu v roce, tj. stav při průtoku  $Q_{90d} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ve stávajícím stavu bylo počítáno s průtokem obou turbín typu Kaplan, tj. průtokem  $2 \times 21 \text{ m}^3/\text{s}$  (Obrázek 35). V plánovaném stavu byla

simulovaná situace obdobná. Zátěžový stav předpokládal maximální výkon turbín s nárůstem odběru na PIT turbínu Kaplan ( $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Přebytečný nevyužitý průtok byl převáděn přes jezovou konstrukci (Obrázek 36). Nastavení obou modelů je zjednodušeně graficky zobrazeno na následujících obrázcích včetně výpočtových meshů.

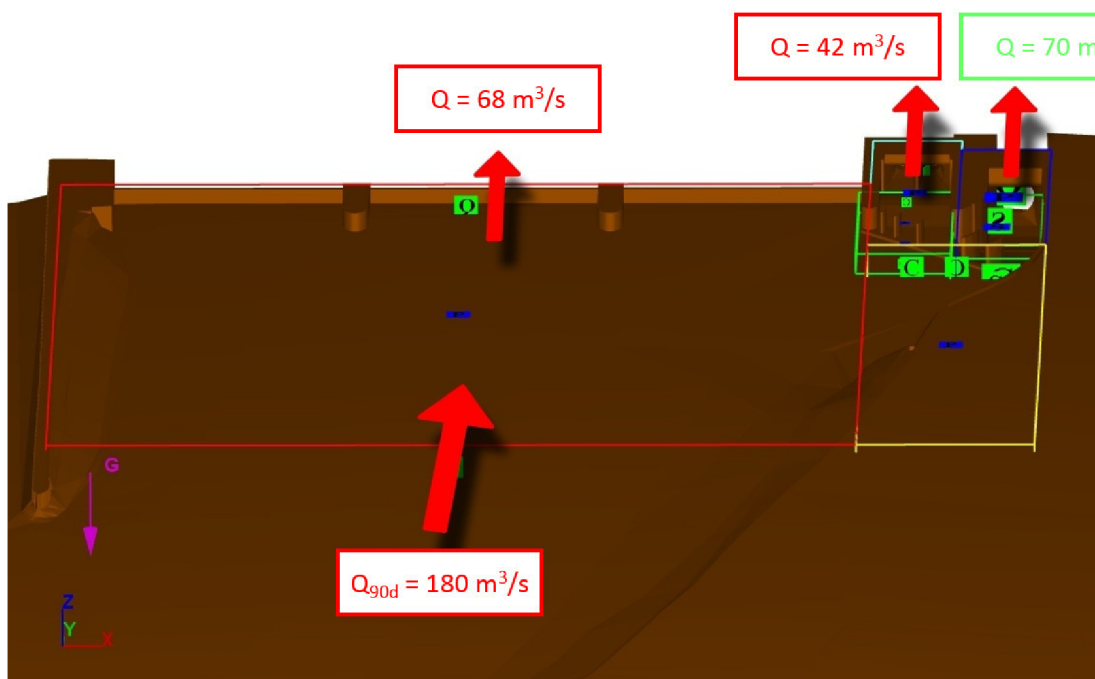
Okrajová podmínka na počátku modelu v říčním profilu byla opět zvolena jako Volume flow rate (Obrázek 31). Hladina byla držena shodně na úrovni stálého vzduť, tj.  $175,00 \text{ m n. m.}$  Zadaný směrový vektor vycházel z předchozích realizovaných simulací. Drsnost v místech betonových částí elektráren byla zadána v modelech jako hodnota  $0,017$ .



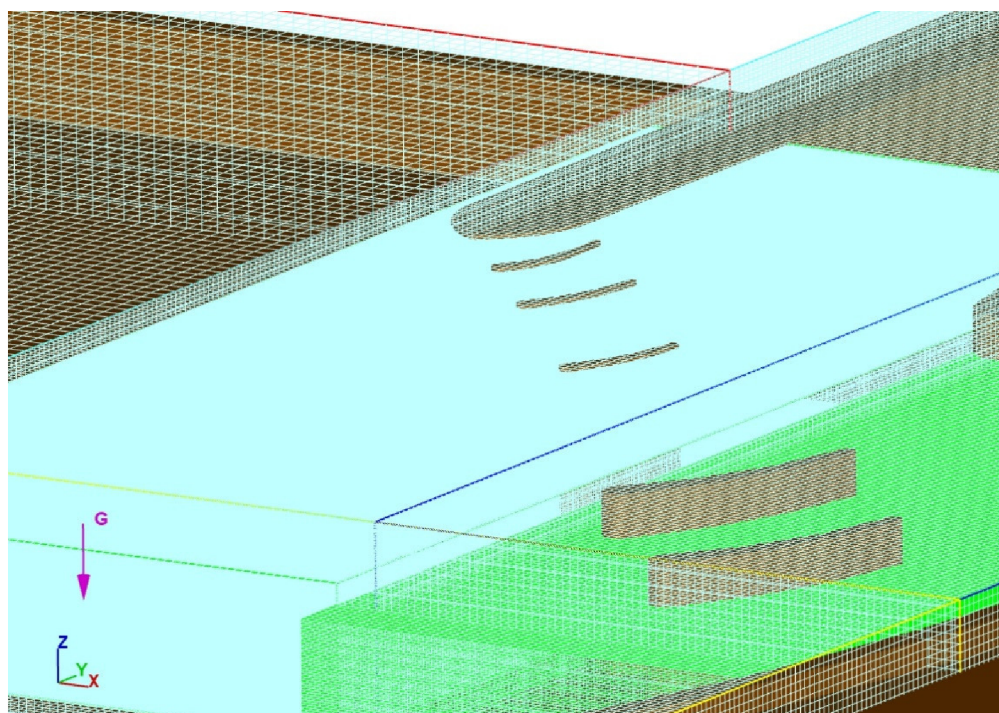
**Obrázek 35 - Nastavení okrajových podmínek stávajícího stavu včetně výpočtových meshů**

Zbývá nastavení výpočtu týkající se počátečních podmínek a délky simulace byly shodné s modely pro posouzení splavnosti v první části práce.

Velikost elementů byla zvolena v jednotlivých modelech individuálně dle celkového počtu, aby byl výpočet vůbec proveditelný, ale zároveň splňoval předpoklad požadovaného výsledku (Obrázek 37). Model byl nastaven tak, že v oblasti jezové zdrže (červený mesh) byly buňky zvoleny  $0,5 \text{ m}$  a poté v nátoku přecházely do jemnější sítě. Zeleně jsou na obrázcích zobrazeny doplňkové meshe, které byly nejjemnější. Tyto buňky měly velikost pouze  $0,1 \text{ m}$ . Model se stávající variantou tedy obsahoval něco málo přes 8 miliónů buněk, varianta s novou MVE kolem 16 miliónů.



Obrázek 36 - Nastavení okrajových podmínek nového stavu včetně výpočtových meshů



Obrázek 37 - Zobrazení meshů s ohledem na hustotu a velikost výpočtových buněk

Takto nastavené modely byly připraveny pro spuštění výpočtu.

## 9. Zpracování výsledků

Tato kapitola se zabývá vlastním zpracováním výsledků. Je rozdělena na dvě části. První část se zabývá vlivem výstavby MVE na tamní plavbu a druhá řeší problematiku rovnoměrných rozložení rychlostního pole nátoků na novou MVE Klecany II.

### 9.1. Zpracování výsledků pro posouzení splavnosti

Abychom mohli vyhodnotit vypočtené výsledky modelování, musíme znát limitní dovolené hodnoty rychlostí proudění, za kterých mohou ještě plavidla vodní cestu využívat. Dále také parametry plavidel a předpisy, které musí dodržovat. Tyto hodnoty jsou uvedeny v normách.

Nejprve si však přiblížíme rozměry lodí, které vodní cestu využívají. V úseku Praha – Holešovice ř. km 49,50 až Mělník ř. km 0,00 (Klecany ř. km 37,08) se za vhodných podmínek pohybují v obou směrech jak plavidla samostatná, tak také tlačné soustavy plavidel s celkovými délkami pohybujícími se až do 110 m. Šířka plavidel dosahuje až 10,6 m s hloubkou ponoru maximálně 1,8 m. Přestože je tento úsek zařazen do IV. třídy vodních cest, nespĺňuje svoji maximální dovolenou plavební hloubkou potřebné parametry. [D6]

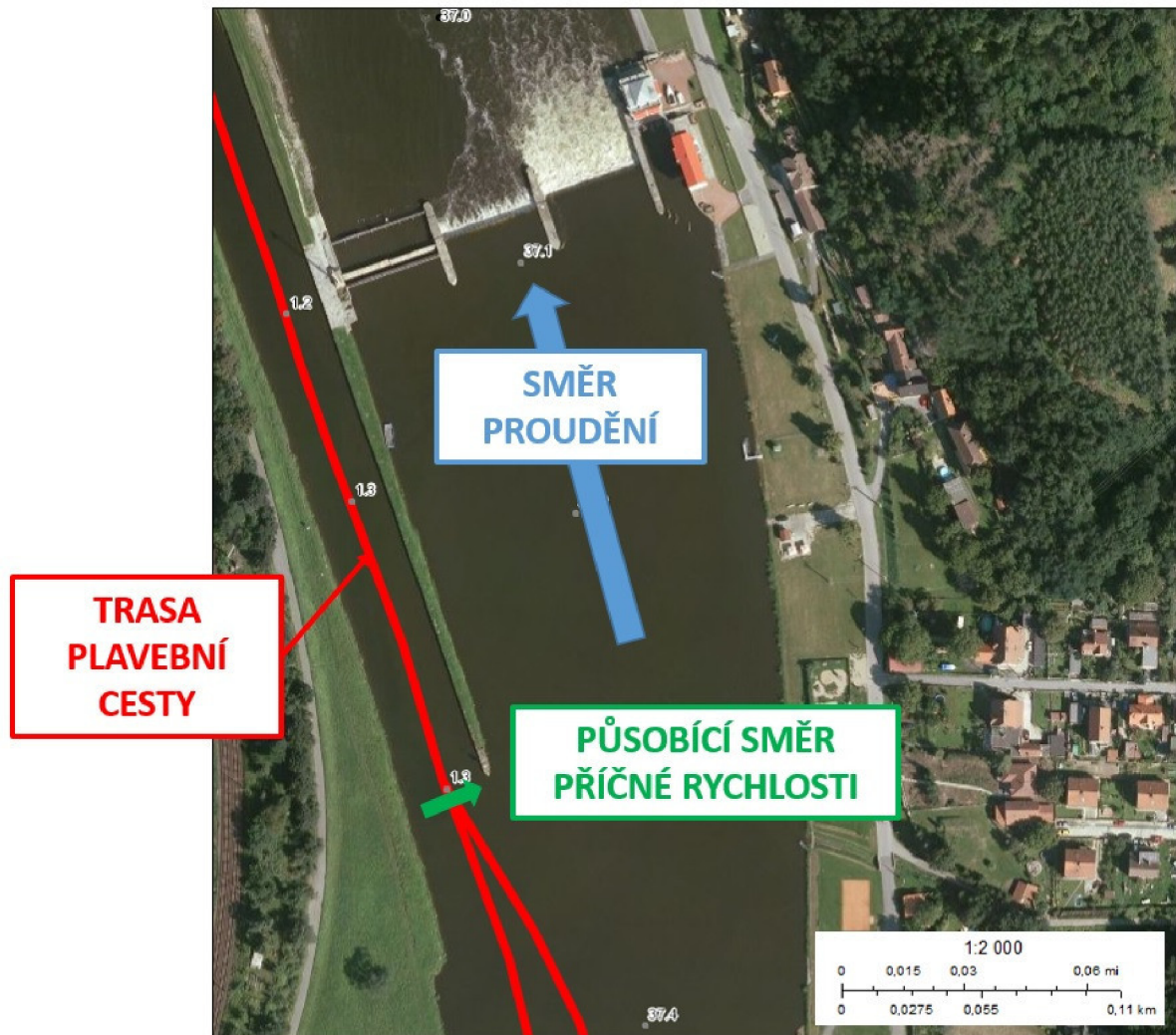
Na vodních cestách jsou nejvyšší povolené rychlosti plavidel následující:

- do vzdálenosti 25 m od břehu 10 km/h,
- v plavebních kanálech u naložených plavidel 5 km/h,
- v plavebních kanálech u ostatních plavidel 10 km/h. [D7]

Maximální rychlosti proudu pro užívání vodní cesty jsou:

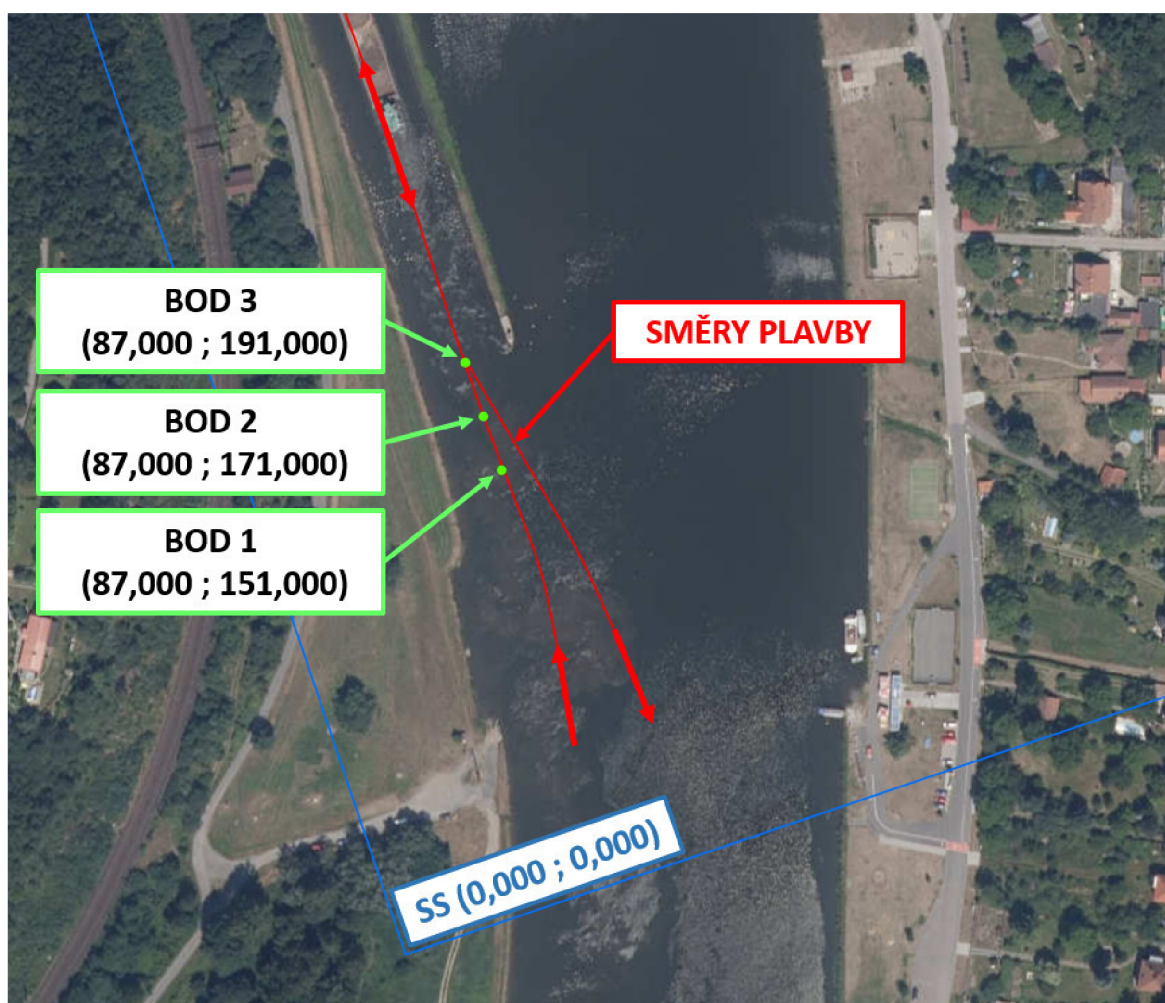
- 1,5 až 1,8 m/s v řece (doporučená hodnota),
- nad 2,5 m/s v řece (plavba je již neekonomická). [D16]

Nejdůležitější rychlostí, kvůli které byl model vytvořen, je příčná rychlost působící kolmo na směr plavební dráhy. Cílem bylo posoudit, jestli výstavbou nové MVE Klecany II nedojde ke zvětšení této nežádoucí rychlosti v místě nájezdu do plavebního kanálu. Hodnota příčné rychlosti, předepsána normou, je  $v_{\max} = 0,2$  m/s. [D8]



Obrázek 38 - Ortofotomapa s vyznačeným směrem proudění, trasou plavební cesty a příčnou rychlostí [C4]

V oblasti před nátokem do plavebního kanálu byly reprezentativně vybrány tři body, které se nacházejí v ose plavební dráhy (Obrázek 39). V těchto bodech (označeny 1,2,3 – Obrázek 39) může dojít k nežádoucím změnám v ohledu působení příčné rychlosti na plavidla v závislosti na výstavbě MVE Klecany II. Výhodou při exportu vypočtených dat z FLOW-3D a následnou prací s nimi byl fakt, že osa  $x$  dílčího zvoleného souřadného systému (vykreslena modře) je téměř dokonale rovnoběžná s plavební dráhou připlouvajících plavidel. Tato shoda velmi zjednodušila zpracování výsledků, protože hodnoty příčných rychlostí z FLOW-3D byly již přímo hledanými příčnými rychlostmi a nebylo tedy nutné je vektorově přepočítávat.



Obrázek 39 - Ortofotomapa s vyznačenými směry plavby (červeně), zvolenými řešeními body (zeleně) a lokálním SS (modře) [C1], [C4]

Pro výše uvedené body bylo provedeno srovnání stávajícího stavu (ss – žluté tabulky) a stavu plánovaného (ps – oranžové tabulky), tj. stav po výstavbě MVE Klecany II. Výsledky vektorů proudění příčných rychlostí byly zpracovány do přehledných tabulek (Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 6), ve kterých jsou uvedeny nejprve rychlosti v závislosti na výšce, ze kterých byla následně vybrána hodnota maximální (červeně) a spočtena průměrná hodnota (zeleně). Průměrná hodnota byla určena integrací po výšce pomocí lichoběžníkového pravidla, kdy průměrná hodnota reprezentuje střední příčnou svislicovou rychlost.

**Tabulka 4 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 1**

BOD 1 - stávající stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	151,000	175,200	0,242
87,000	151,000	174,800	0,243
87,000	151,000	174,400	0,244
87,000	151,000	174,000	0,245
87,000	151,000	173,600	0,244
87,000	151,000	173,200	0,242
87,000	151,000	172,800	0,239
87,000	151,000	172,400	0,224
průměrná příčná rychlost =			0,241

BOD 1 - plánovaný stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	151,000	175,200	0,243
87,000	151,000	174,800	0,245
87,000	151,000	174,400	0,246
87,000	151,000	174,000	0,247
87,000	151,000	173,600	0,247
87,000	151,000	173,200	0,245
87,000	151,000	172,800	0,242
87,000	151,000	172,400	0,227
průměrná příčná rychlost =			0,244

**Tabulka 5 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 2**

BOD 2 - stávající stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	171,000	175,200	0,270
87,000	171,000	174,800	0,270
87,000	171,000	174,400	0,269
87,000	171,000	174,000	0,267
87,000	171,000	173,600	0,265
87,000	171,000	173,200	0,261
87,000	171,000	172,800	0,256
87,000	171,000	172,400	0,229
průměrná příčná rychlost =			0,262

BOD 2 - plánovaný stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	171,000	175,200	0,273
87,000	171,000	174,800	0,273
87,000	171,000	174,400	0,272
87,000	171,000	174,000	0,270
87,000	171,000	173,600	0,268
87,000	171,000	173,200	0,265
87,000	171,000	172,800	0,260
87,000	171,000	172,400	0,234
průměrná příčná rychlost =			0,266

**Tabulka 6 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 3**

BOD 3 - stávající stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	191,000	175,200	0,038
87,000	191,000	174,800	0,038
87,000	191,000	174,400	0,038
87,000	191,000	174,000	0,038
87,000	191,000	173,600	0,037
87,000	191,000	173,200	0,037
87,000	191,000	172,800	0,037
87,000	191,000	172,400	0,023
průměrná příčná rychlost =			0,036

BOD 3 - plánovaný stav			
souřadnice X	souřadnice Y	souřadnice Z [m n. m.]	příčná rychlost [m/s]
87,000	191,000	175,200	0,046
87,000	191,000	174,800	0,046
87,000	191,000	174,400	0,046
87,000	191,000	174,000	0,045
87,000	191,000	173,600	0,045
87,000	191,000	173,200	0,045
87,000	191,000	172,800	0,044
87,000	191,000	172,400	0,031
průměrná příčná rychlost =			0,044



V následující tabulce (Tabulka 7) bylo provedeno shrnutí obou stavů s vypočtenými rychlostními a procentuálními změnami.

**Tabulka 7 - Přehledné porovnání stávajícího a plánovaného stavu ve všech bodech**

BOD	souřadnice X	souřadnice Y	$v_{\max,ss}$ [m/s]	$v_{\max,ps}$ [m/s]	rozdíl [m/s]	rozdíl [%]	$v_{pr,ss}$ [m/s]	$v_{pr,ps}$ [m/s]	rozdíl [m/s]	rozdíl [%]
1	87.000	151.000	0.245	0.247	0.002	0.95	0.241	0.244	0.002	0.99
2	87.000	171.000	0.270	0.273	0.003	1.04	0.262	0.266	0.004	1.35
3	87.000	191.000	0.038	0.046	0.008	17.83	0.036	0.044	0.008	17.45

Z výsledků je tedy zřejmé, že výstavba nové MVE Klecany II při takto zvoleném průtoku nebude mít negativní vliv na proudové poměry v místech určených pro plavbu. Konkrétně v bodech 1 a 2 se příčná rychlost zvýší přibližně o 1 % jak u maximálních porovnávaných rychlostí, tak u rychlostí průměrných. V bodě 3 je rozdíl kolem 17 %, což se může zdát rozdílem značným, ale podíváme-li se pozorně, tak rychlosti jsou v těchto místech velmi malé (uzavřená vrata plavebního kanálu). Tento rozdíl může vzniknout oscilací při výpočtu a není nutné se touto změnou více zabývat.

Z výsledků dále vyplývá, že je splněna podmínka maximální příčné rychlosti 0,2 m/s, která určuje požadavky pro rychlost v plavební dráze na úrovni dělicího pilíře plavebního kanálu a bezprostředně před ním, dle požadavků normy [D8]. V tomto případě se tedy vztahuje pouze na bod s označením 3.

## 9.2. Zpracování výsledků pro posouzení tvaru nátoků na MVE Klecany II

Tato kapitola se zabývá zpracováním výsledků simulace stávajícího a nově navrženého stavu nátoků na elektrárny. Před vlastním zpracováním výsledků byly v následujícím odstavci uvedeny obecné požadavky pro vtokové objekty.

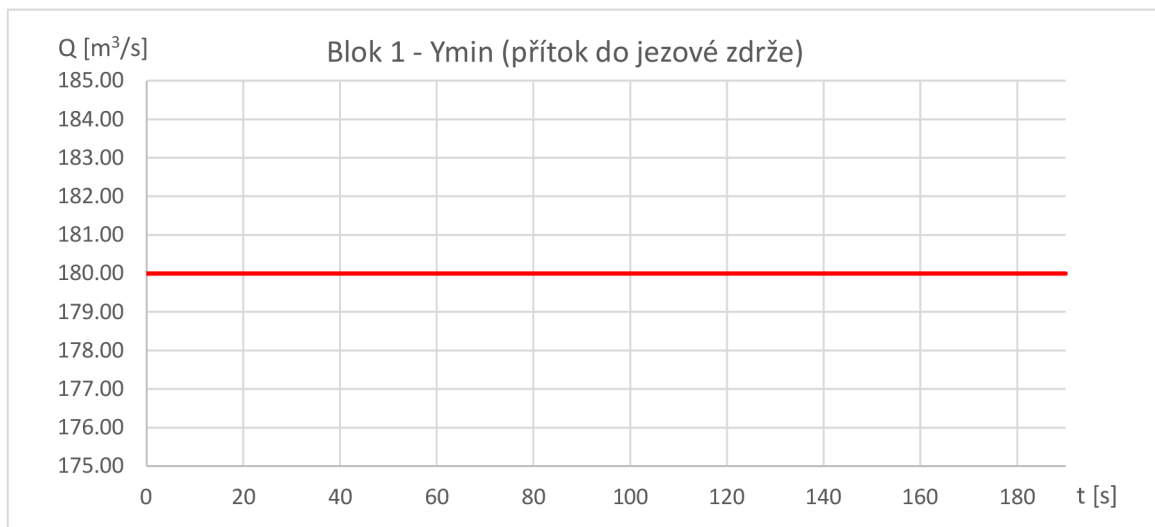
Celkově lze shrnout požadavky do několika bodů:

- Zajištění potřebného přítoku vody na turbíny elektrárny po celou dobu životnosti díla.
- Plaveniny a splaveniny nesmí ohrozit funkci turbín. Z tohoto důvodu se práh navyšuje zpravidla minimálně 0,5 m nad dno horní zdrže a na nátoků bývají osazeny hrubé a poté jemné česle, které musí být čištěny.
- Konstrukční prvky objektu nesmí namrzat.
- Vtokový objekt musí svojí konstrukcí a výškovým umístěním zabránit vnikání vzduchu do hydraulického systému vodních turbín. Vhodným návrhem musí být eliminováno vytváření vírů.
- Hydraulické ztráty musí být co nejmenší. [D17]

### 9.2.1. Varianta stávajícího stavu

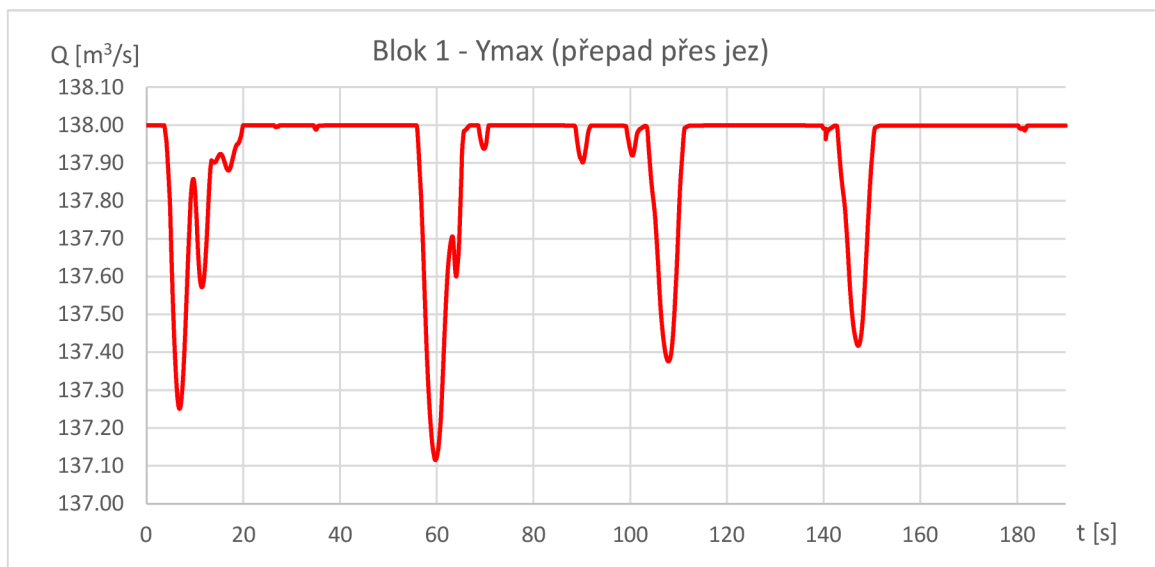
Pro simulaci byl zvolen průtok  $Q_{90} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$  (Kap. 8.2). Přerozdělení průtoků bylo již graficky uvedeno dříve (Obrázek 35). Přestože byla simulace nastavena na délku 3000 sekund, tak vzhledem k délce trvání jednotlivých výpočtů byla simulace ukončena po 190 sekundách. Následující grafy zobrazují nátoky a výtoky v jednotlivých okrajových podmínkách během simulace. Na jejich základě a kontrole výsledků se dal výpočet považovat za ustálený.

Přítok do jezové zdrže byl konstantně udržován na hodnotě  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  (Obrázek 40).

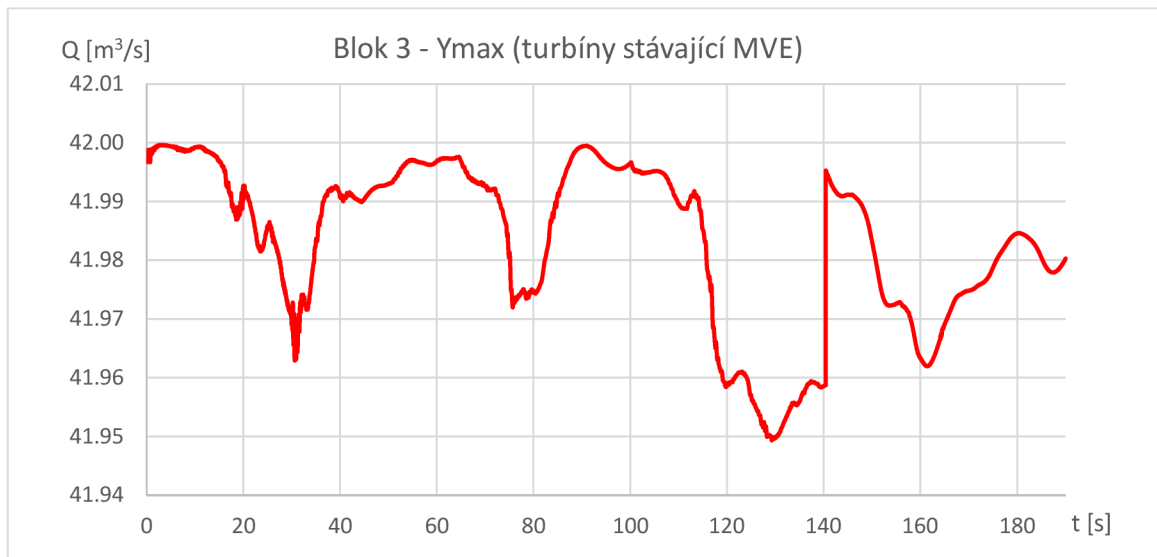


Obrázek 40 - Přítok do jezové zdrže v závislosti na času simulace

Tento průtok byl přerozdělen na stávající MVE Klecany I s maximální hltností turbín  $42 \text{ m}^3/\text{s}$  (Obrázek 42) a přebytekový průtok byl převáděn přes jezovou konstrukci (Obrázek 41).

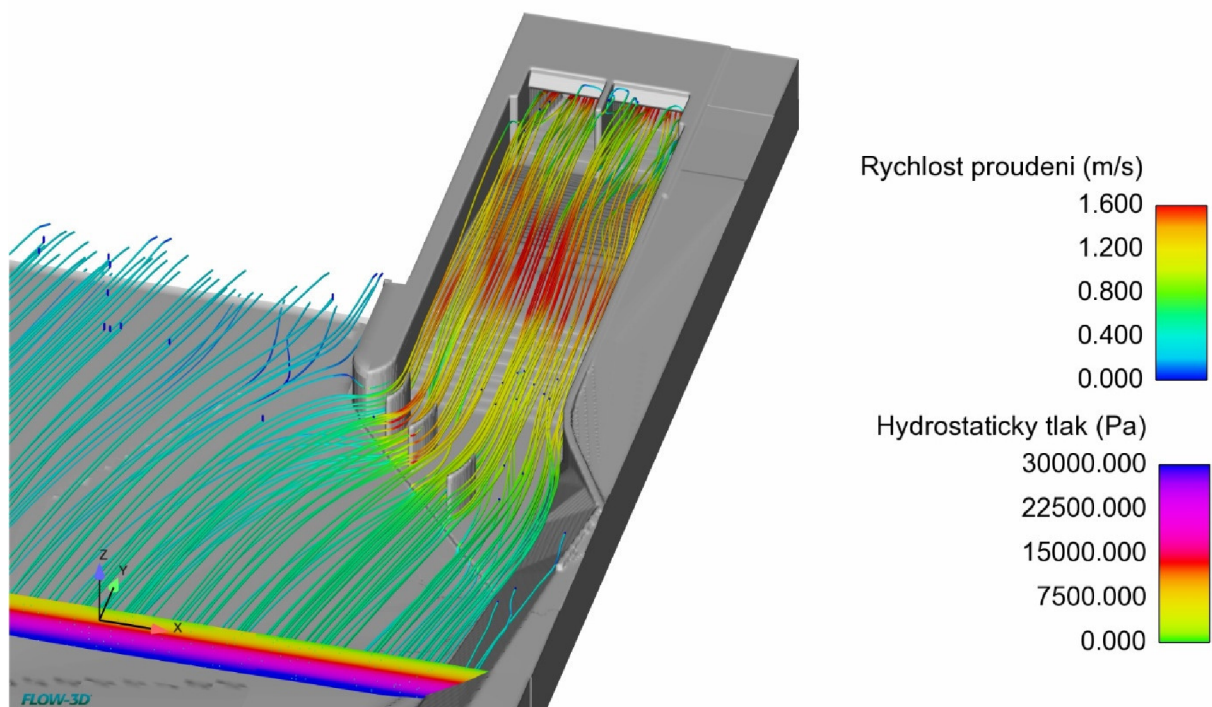


Obrázek 41 - Přepad přes jezovou konstrukci v závislosti na času simulace



**Obrázek 42 - Průtok MVE Klecany I v závislosti na času simulace**

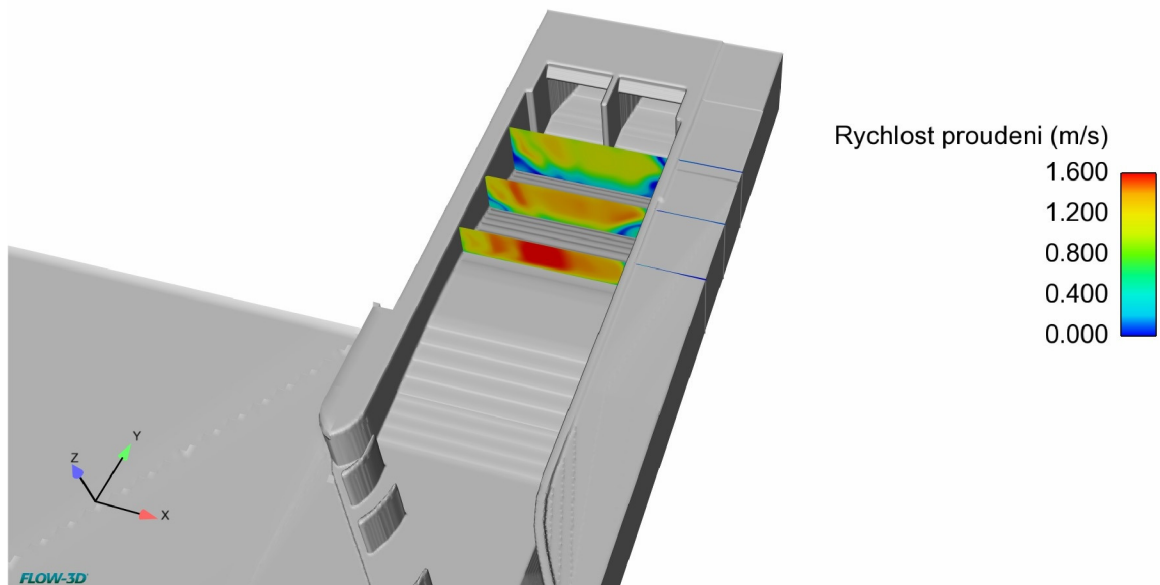
Tyto grafy sloužily hlavně pro kontrolu, že simulovaný děj probíhal správně. Simulace stávajícího stavu s ohledem na směry proudnic a rychlosti sloužila jako ověření správnosti řešení, než se přistoupilo k variantě s již vybudovanou MVE Klecany II.



**Obrázek 43 – 3D proudnice na stávajícím nátoku s vyznačením rychlostí a hydrostatickým tlakem v místě řezu v nadjezí**

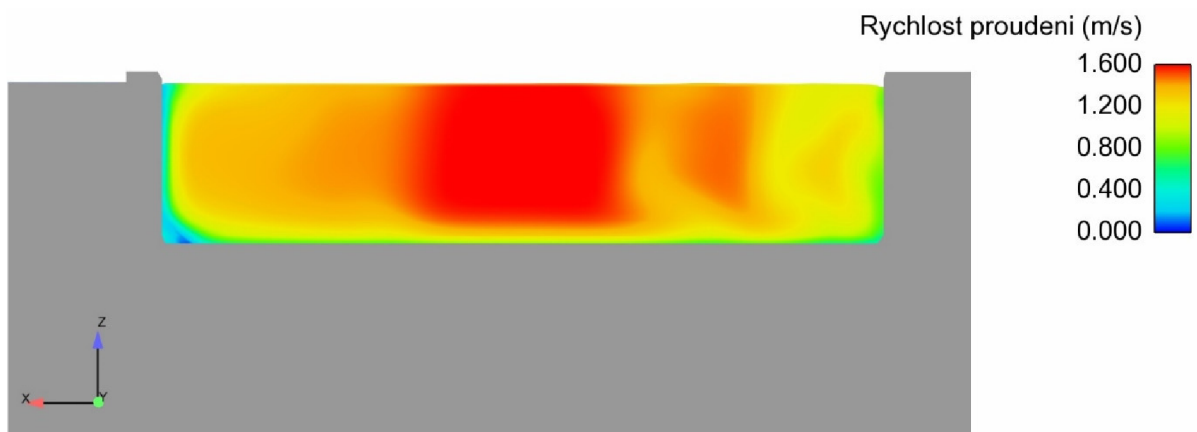
Abychom mohli prohlásit nátok za tvarově hydraulicky vhodný, musíme posoudit rozložení rychlostního pole v nátoku a těsně před zaústěním do turbíny, aby docházelo k jejímu

rovnoměrnému zatížení přitékající vodou. Z tohoto důvodu byly provedeny příčné řezy v nátoku (Obrázek 44), ve kterých je zmiňovaná rovnoměrnost rychlostí patrná. Dále byly sledovány proudnice, jestli nedochází k jejich odtrhávání od dělicího pilíře.



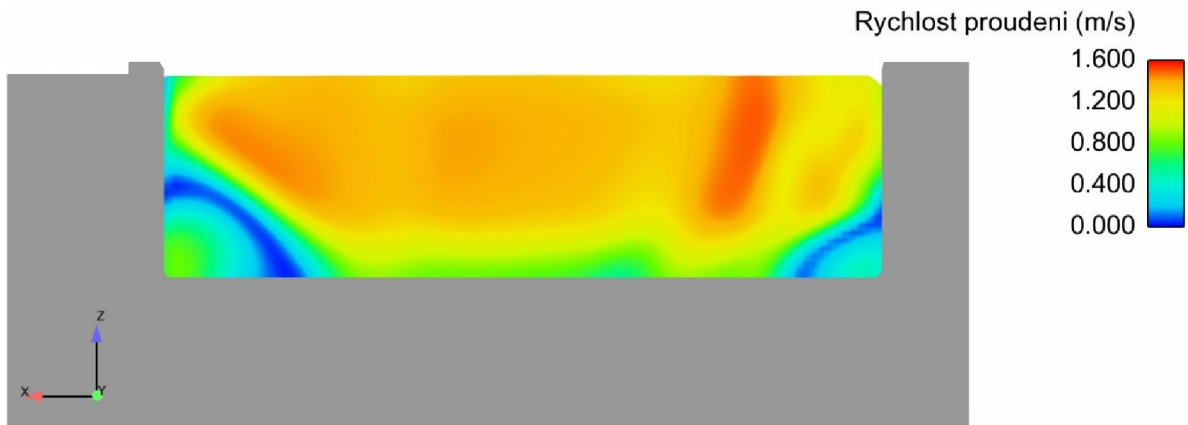
**Obrázek 44 - Příčné řezy ve stávajícím nátoku 3D**

Jednotlivé řezy byly zvoleny ve vzdálenostech 3, 8 a 13 metrů od začátku dělicího nátokového pilíře. Na následujících obrázcích (Obrázek 47, Obrázek 46, Obrázek 45) jsou zobrazeny zmiňované řezy detailněji ve směru proudění s protiproudním pohledem.



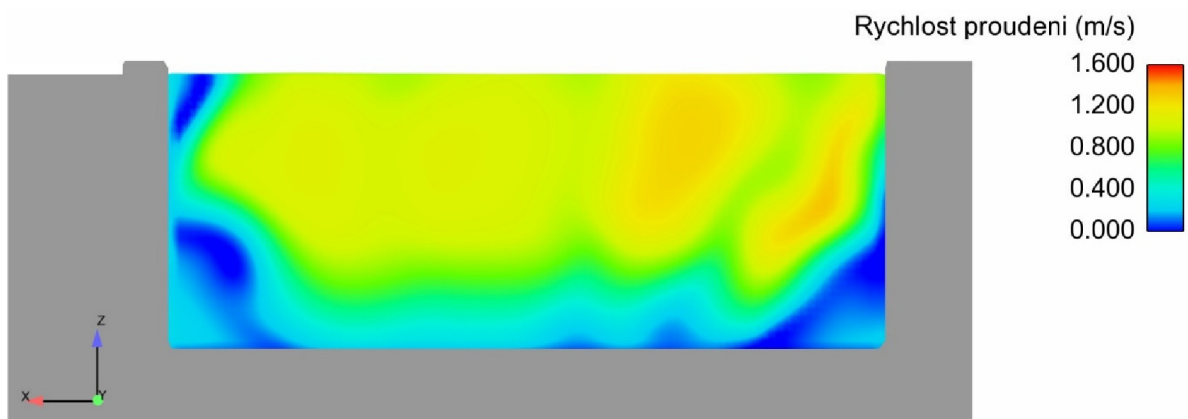
**Obrázek 45 - Protiproudní pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 13 m od dělicího pilíře**

Obrázek 45 zobrazuje rychlostní pole proudění. Rychlosti jsou mírně vyšší uprostřed nátoku, kde dosahují rychlostí až 1,6 m/s.



**Obrázek 46 - Protiproudání rychlostního pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 8 m od dělicího pilíře**

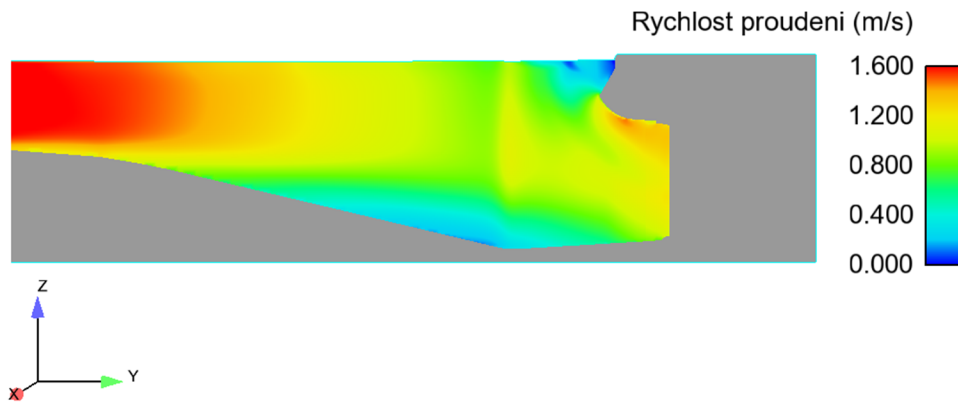
Obrázek 46 reprezentuje příčný řez o 5 metrů blíže nátoku. Rychlostní pole je zde značně rovnoměrnější a vlivem zvětšující se průtočné plochy nátoku (klesání dna) dochází i ke snižování rychlostí. Podíváme-li se pozorně na prostory v dolních rozích, je z nich patrné, že v této části dochází k vytváření turbulencí. Na reálném díle však k těmto jevům docházet nemusí nebo jsou složitě sledovatelné. Turbulence mohou být způsobeny numerickou nestabilitou výpočtu a popřípadě oscilací proudění díky turbulencím. Stabilita výpočtu je určena souhrou několika faktorů, tj. složitostí a velikostí řešené oblasti, velikostí buněk v modelu, přechody mezi jednotlivými meshy a nepochybně také okrajovými podmínkami. Z důvodu časové náročnosti na výpočet nebyl prostor pro další navazující varianty a modifikace nastavení výpočtu a jeho následné několikátýdenní řešení.



**Obrázek 47 - Protiproudání rychlostního pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 3 m od dělicího pilíře**

Poslední, tj. neblížejší příčný řez stávajícím nátokem je již plně vyhovující. Rychlostní pole je rovnoměrné a rychlost se pohybuje do 1,2 m/s. Tato rychlost je vhodná na nátoku právě v prostoru jemných česlí před vstupem do tlakové části MVE.

Z podélného řezu stávajícím nátokem je patrné postupné snižování rychlostí. V místě menší průtočné plochy v nejvyšším místě jsou rychlosti nejvyšší (až 1,6 m/s). U dna před vtokem k turbíně je viditelná dříve zmiňovaná turbulence.

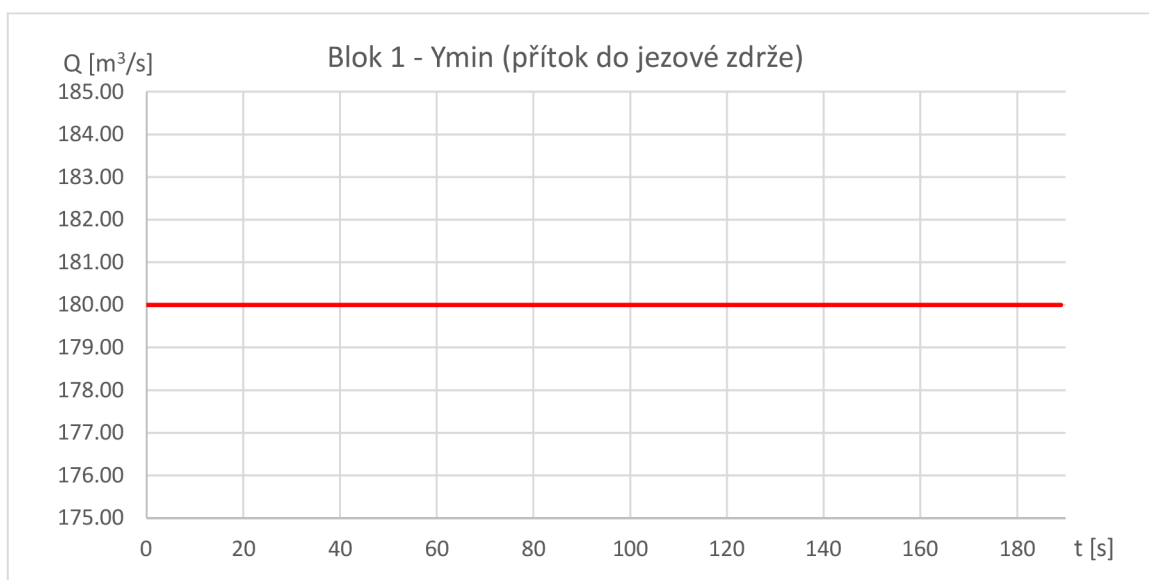


**Obrázek 48 - Podélný řez stávajícím nátokem**

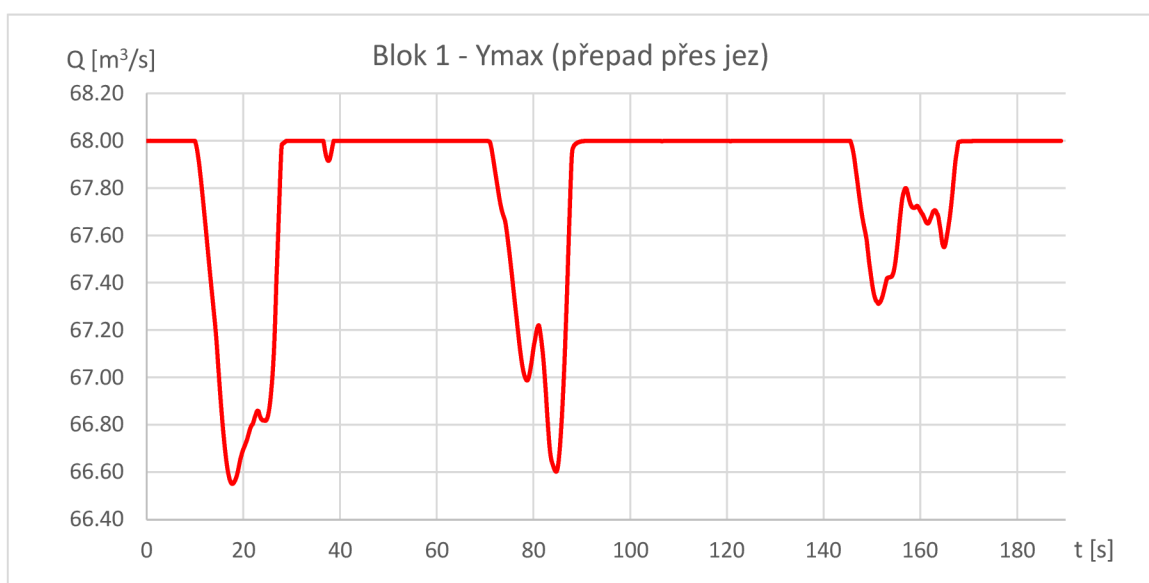
### 9.2.2. Stav po výstavbě MVE Klecany II

Ve druhé variantě plánovaného stavu byl simulován totožný průtok, který odpovídal hodnotě  $Q_{90} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ . V tomto případě však vlivem výstavby nové MVE Klecany II bylo nutné přerozdělit průtoky jinak (Obrázek 36). Oproti variantě stávající byl zredukován průtok přes jez právě o hodnotu maximální hltnosti nové PIT turbíny ( $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

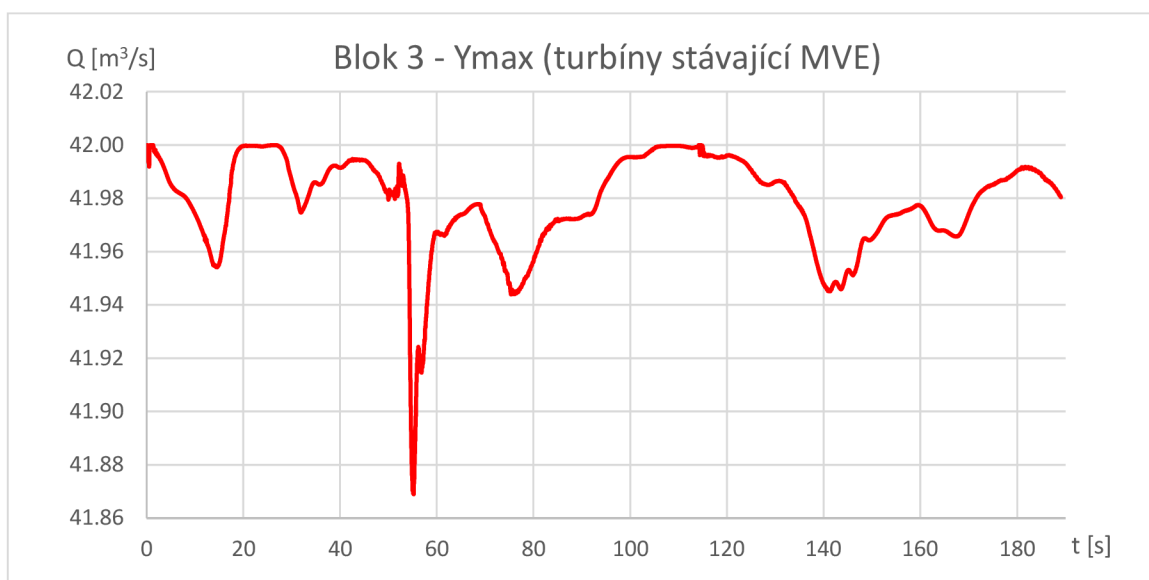
Na následujících obrázcích (Obrázek 49, Obrázek 50, Obrázek 51, Obrázek 52) jsou opět zobrazeny průběhy průtoků v jednotlivých okrajových podmínkách simulačního modelu. Stejně jako v předchozí variantě byl výpočet ukončen po 190 sekundách.



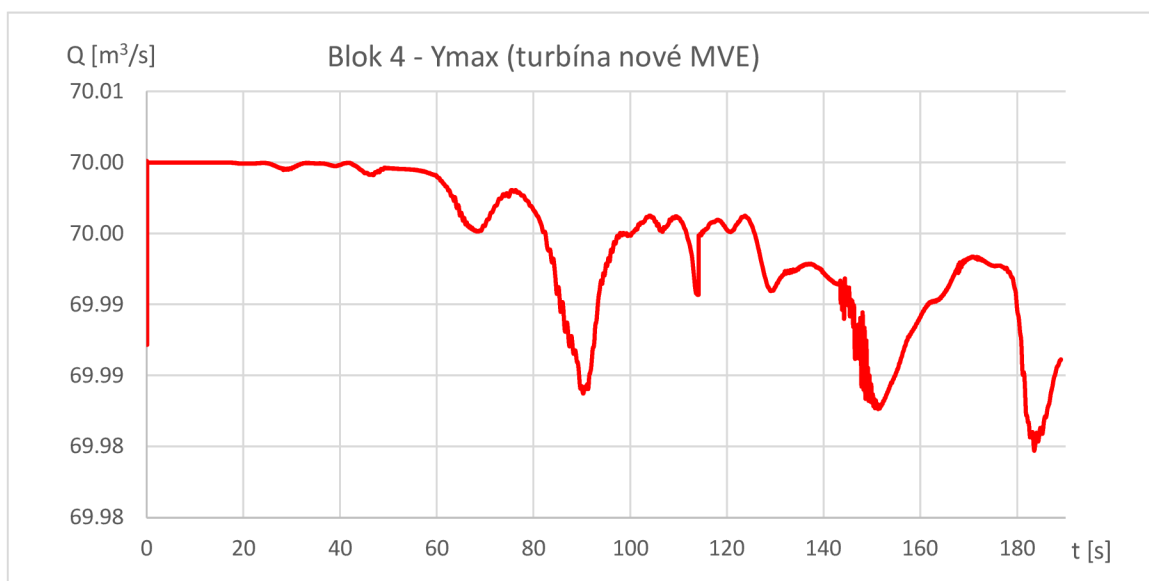
Obrázek 49 - Přítok do jezové zdrže v závislosti na času simulace



Obrázek 50 - Přepad přes jezovou konstrukci v závislosti na času simulace

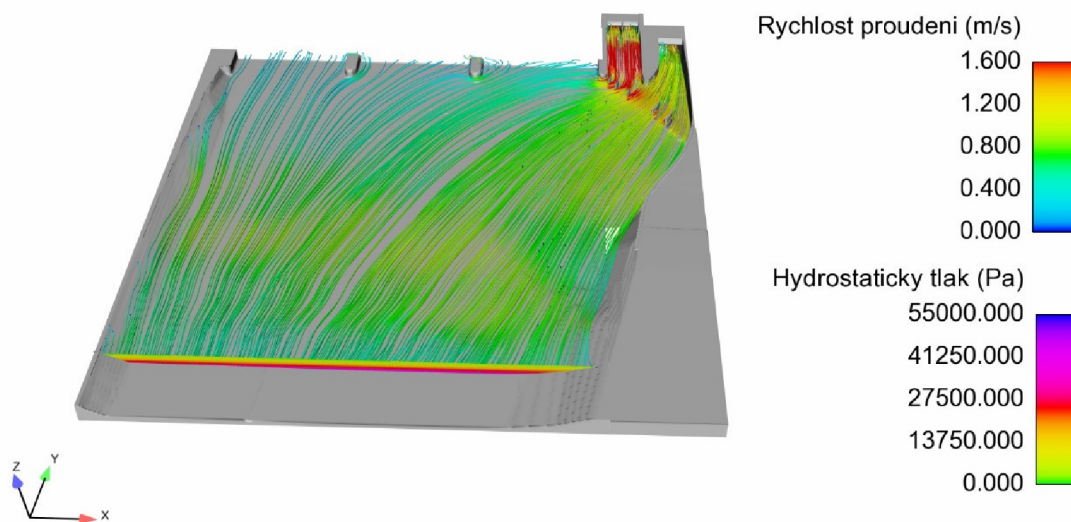


Obrázek 51 - Průtok MVE Klecany I v závislosti na času simulace



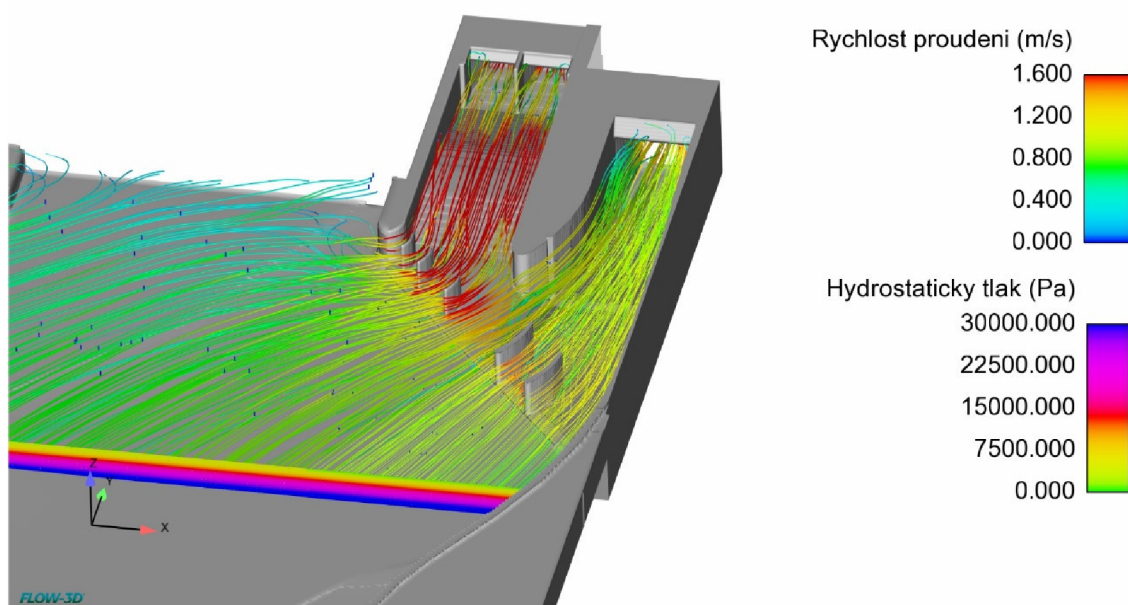
Obrázek 52 - Průtok MVE Klecany II v závislosti na času simulace





**Obrázek 53 – 3D proudnice na stávajícím a novém nátoku s vyznačením rychlostí a hydrostatickým tlakem v místě řezu v nadjezí**

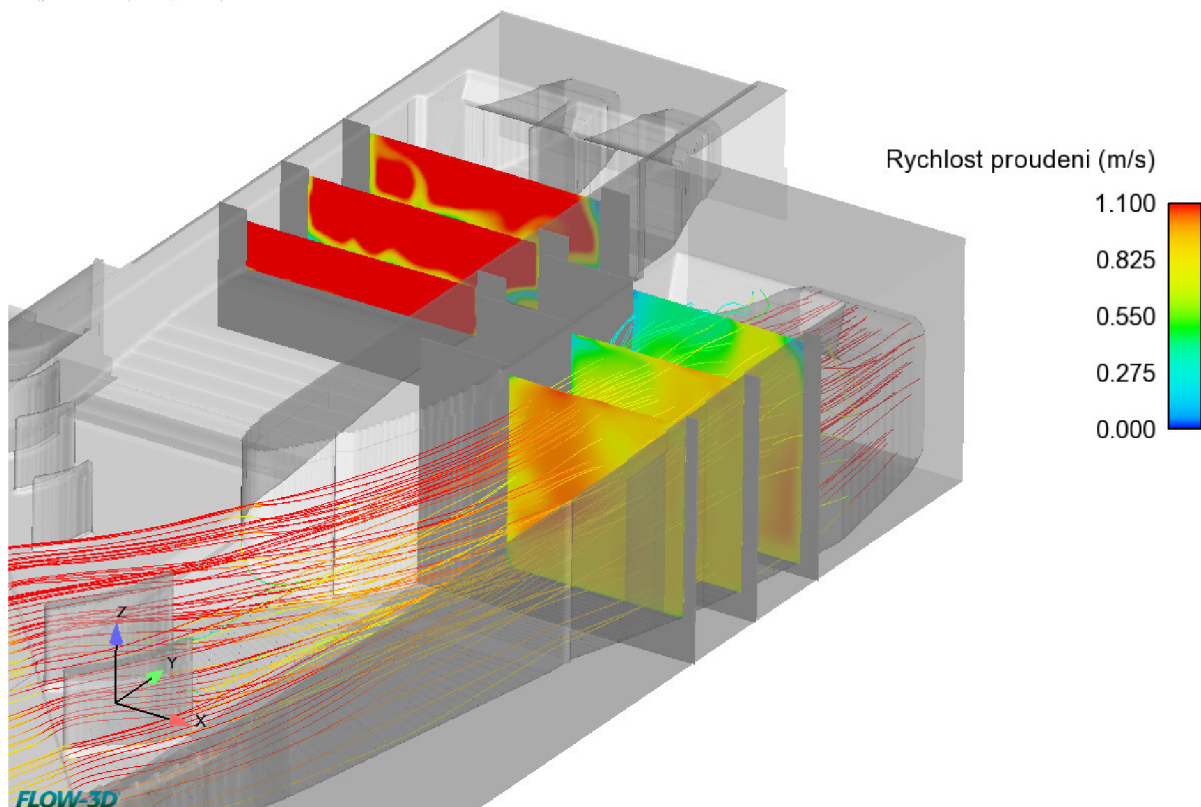
Porovnáme-li průběh proudnic přitékající vody na stávající nátok MVE Klecany I, zjistíme velkou změnu směru. Ve stávající variantě jsou proudnice přímé, v nové variantě je sběrná plocha o mnoho širší. Změna polohy proudnic přitékající na stávající MVE je logicky dána tím, že nová MVE původní oblast přítoku svojí hltností převezme a stávající MVE je dotována téměř až od levého břehu oddělující jez od plavebního kanálu. Tato okolnost vysvětluje vyšší rychlosti na stávajícím nátoku v oblasti dělících pilířů. V nové variantě tedy nabývají vyššího významu a uplatnění pro usměrnění přitékající vody (Obrázek 53, Obrázek 54).



**Obrázek 54 - Detail 3D proudnic na obou nátocích (proudnice obarveny dle rychlostí proudění a řez tokem dle hydrostatického tlaku)**

Určitou míru vlivu na malou změnu rychlostí při porovnání stavu stávajícího se stavem novým má právě zmiňovaná oscilace, díky které se v každém uloženém časovém okamžiku mírně mění směry a velikosti rychlostí. Proto byly vybrány reprezentativní časové okamžiky jednotlivých simulací po ustálení.

Stejně jako ve stávající variantě byly vytvořeny příčné řezy jednotlivými nátoky ve stejných vzdálenostech od nátoky, tj. 3, 8 a 13 m. Pro lepší orientaci na následujícím obrázku (Obrázek 55) jsou řezy zobrazeny ve 3D modelu.



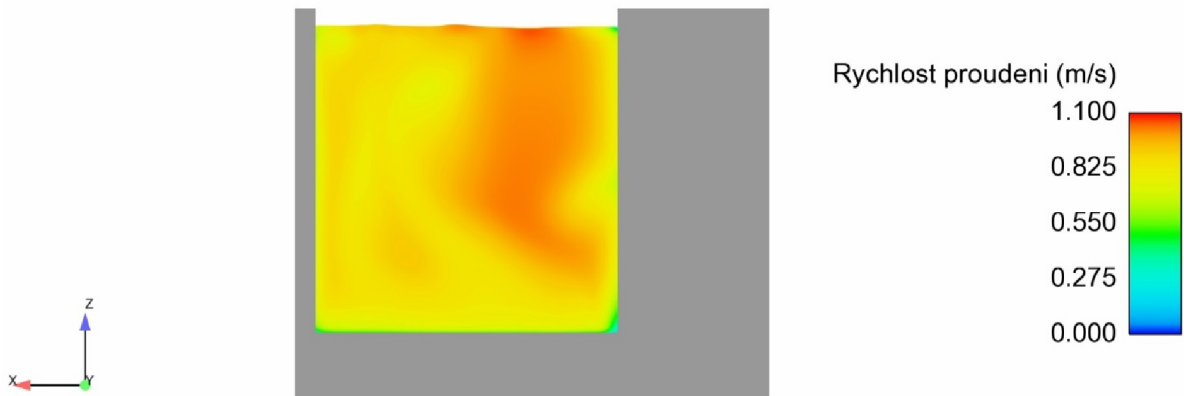
**Obrázek 55 - Řezy jednotlivými nátoky společně s detailem 3D proudnic nového nátoky na MVE Klecany II**

Považuji za důležité zmínit, že pro lepší zobrazení rychlostních polí byla upravena barevná škála rozsahu vykreslení pro rychlosti proudění na nižší hodnotu. V novém nátoky jsou rychlosti nižší, takže pokud bychom úpravu neprovedli, nebylo by rychlostní pole rozeznatelné a splynulo by téměř do jedné barvy.

Následující obrázky (Obrázek 56, Obrázek 57, Obrázek 58) zobrazují rychlostní pole v pořadí přitékající vody s protiproudícím pohledem.

Obrázek 56 je řez novým nátokem ve vzdálenosti 13 m od tlakové části proudění na PIT turbínu. Toto místo je velmi ovlivněno vybudovaným dělicím pilířem, který rozděluje průtok

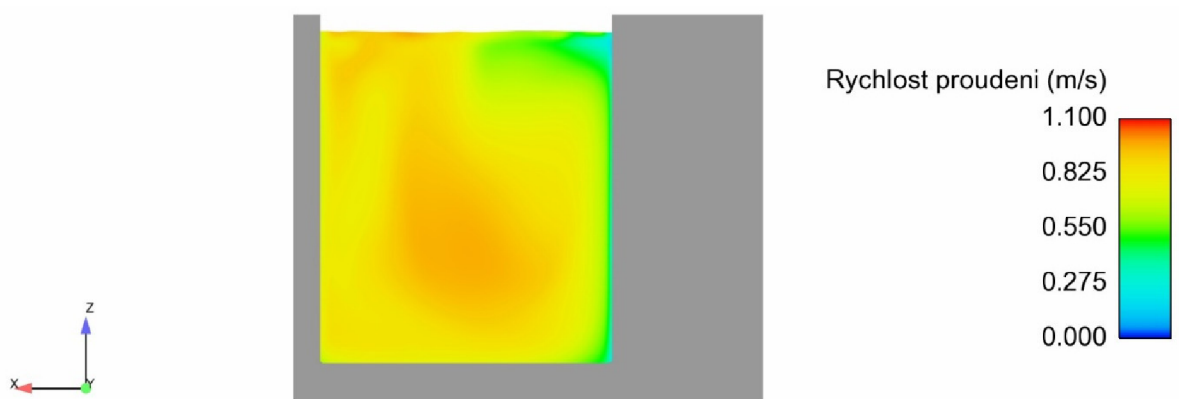
na jednotlivé elektrárny. Rychlostní pole zde není zatím rovnoměrné, rychlosti se pohybují přibližně od 0,8 do 1,1 m/s.



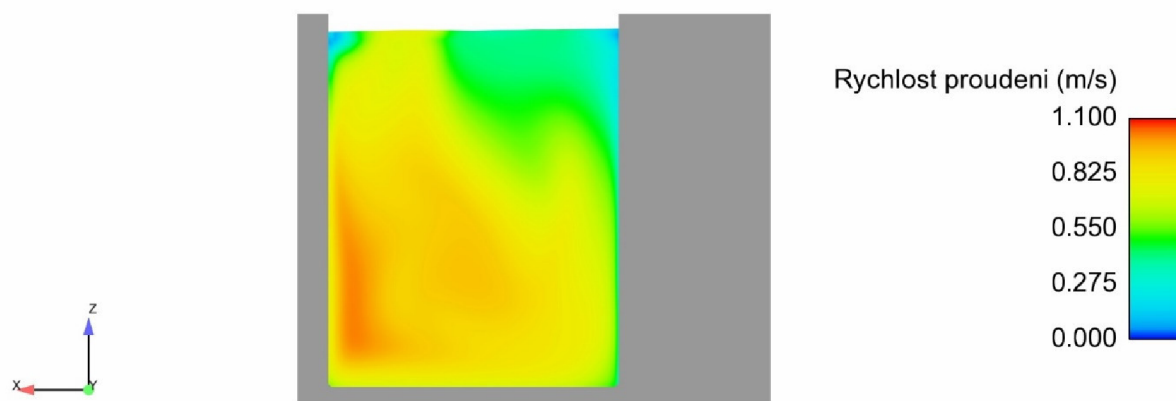
**Obrázek 56 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 13 m od tlakové části nátoku**

V následujícím příčném řezu (Obrázek 57), který je o 5 metrů dále se situace výrazně zlepšuje. Rychlosti se vyrovnávají a maximální se pohybuje již kolem 1 m/s.

Příčný řez bezprostředně před tlakovou částí (Obrázek 58) byl opět ovlivněn turbulencí, kterou lze postřehnout v pravém horním rohu. Jedná se o stejnou nestabilitu výpočtu jako při posouzení stávajícího nátoku. K této turbulenci by docházet při výpočtu nemělo a důvody vzniku byly popsány v předchozím textu. V závěru práce bude ještě tato problematika doplněna o další možná řešení, jak těmto nežádoucím jevům předejít.

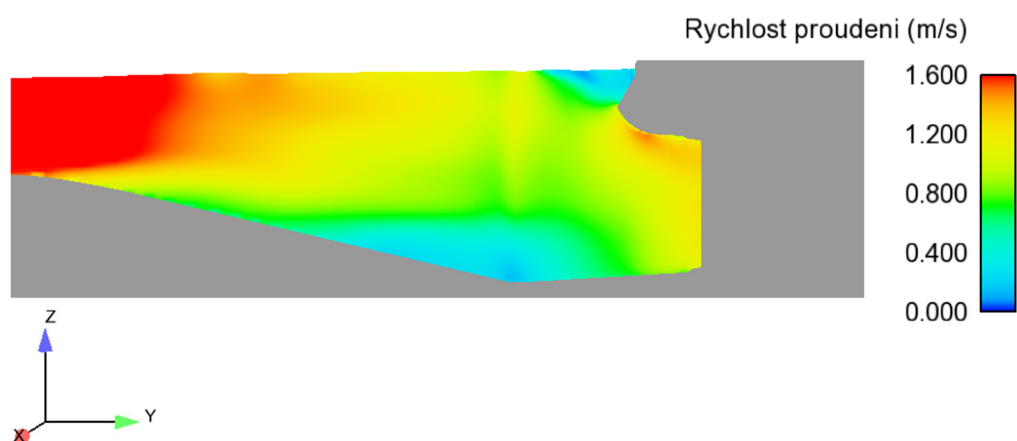


**Obrázek 57 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 8 m od tlakové části nátoku**

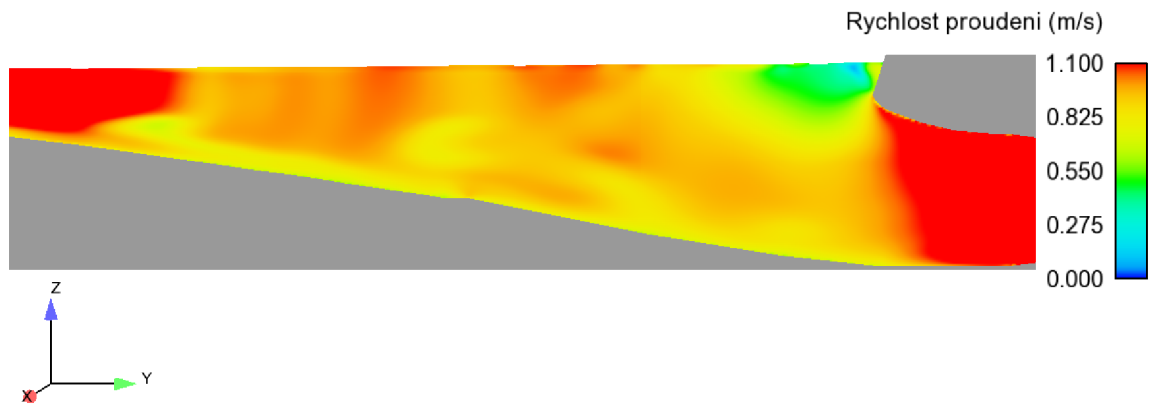


**Obrázek 58 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 3 m od tlakové části nátoku**

Vzniklé turbulence jsou lépe viditelné v podélných řezech jednotlivými nátoky. Na stávajícím nátoku (Obrázek 59) se objevila při výpočtu turbulence opět u dna před nátokem a v nové variantě nahoře před tlakovou částí (Obrázek 60).



**Obrázek 59 - Podélný řez stávajícím nátokem**



**Obrázek 60 - Podélný řez novým nátokem**

Z prezentovaných výsledků je tedy zřejmé, že rychlostní pole v oblasti česlí za simulovaného stavu na stávajícím nátoku se nijak zásadně nemění. Nátok na novou MVE Klecany II lze prohlásit za daného simulovaného děje jako vyhovující s ohledem na tvar dělicího pilíře a umístěním dvojice usměřňovacích křídel. Určitou problematiku do vyhodnocení vnesly okolnosti s výskytem zmiňovaných turbulencí a pulzací, které se reálně na díle v určité míře také vyskytují, ale jejich postihnutí je velmi složité. Pro eliminaci těchto nežádoucích dějů by bylo nutné přenastavit výpočetní model. První podmínkou by jistě bylo jeho zmenšení, kdy by bylo vhodnější odebrat modelovanou oblast nadjezí a věnovat se přímo oblasti nátoků. Tato okolnost by však sebou přinesla další problém se zadáním okrajové podmínky, neboť FLOW-3D ji umožňuje zadat pouze do celé plochy výpočtového meshe. V tomto případě by došlo k velkému zjednodušení, které by mohlo ovlivnit výsledky. Dále by pomohlo ukončení oblasti před tlakovou částí jednotlivých elektráren. Dle rychlých testů, které byly provedeny na závěr práce vznikají v tomto prostoru nestability, které velmi komplikují výpočet v souvislosti se zadanou okrajovou podmínkou. Dále výpočet komplikují přechody mezi jednotlivými velikostmi výpočtových meshů. Obecně se nestabilita projevuje rapidním zpomalením výpočtu, neboť dojde ke dramatickému zmenšení časového kroku, tj. až na řádově miliontiny sekundy. Tato skutečnost znamená výrazné zpomalení výpočtu, který i tak za ideálních podmínek v tomto rozsahu trval 3 až 4 týdny.

Vzhledem k okolnostem turbulencí a problematice při simulaci nátoků ve 3D jsou výsledky považovány za orientační a pro reálné zhodnocení stavu nátoků by bylo vhodné model dopracovat a dořešit podrobněji.

## 10. Závěr a zhodnocení

Byla zpracována analýza proudových poměrů u vodního díla Klecany-Roztoky na řece Vltavě v říčním kilometru 37,08. Výpočtům proudění povrchové vody v programu FLOW-3D předcházela tvorba DMT koryta nadjezí, plavebního kanálu s kombinací 3D modelu stávajícího (MVE Klecany I) a plánovaného nátoku (MVE Klecany II). Postup vytváření 3D modelu je popsán v Kap. 5.

Práce je rozdělena na dvě části dle požadovaných cílů. První část práce se zabývá posouzením vlivu výstavby plánované MVE Klecany II k současné MVE Klecany I na stávající plavební činnost při průtoku  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Neznalost směru proudění na počátku modelu ve FLOW-3D vedla k vytvoření DMT a výpočtu 2D proudění v programu HEC-RAS (Kap. 7). Zjištěná okrajová podmínka byla hlavním předpokladem pro vlastní výpočet ve FLOW-3D a následné vyhodnocení výsledků (Kap. 8.1 a 9.1).

Na základě výpočtů lze konstatovat, že výstavba MVE Klecany II při simulovaném zatěžovacím stavu při průtoku  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  nebude mít výrazný vliv na plavbu v místě dělicího pilíře či v bezprostřední vzdálenosti před ním. V těchto místech tedy nedochází k překročení maximální dovolené příčné rychlosti proudění vody, která je normou doporučena na hodnotu  $0,2 \text{ m/s}$ .

Druhá část práce je zaměřena na posouzení tvaru nátoku nové MVE Klecany II. Vytvořené modely z předchozího řešení byly upraveny dle potřeby a byla výrazně zahuštěna výpočetní mřížka pro přesnější výsledky. Vlastní nastavení modelů se zpracovanými výsledky jak stávající, tak plánované varianty, je popsáno v Kap. 8.2. a 9.2.

Na základě výpočtů lze prohlásit, že za simulovaného běžného průtoku  $Q_{90} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$  nedojde k negativnímu ovlivnění zatížení stávajících turbín MVE Klecany I. Návrh tvaru stávajícího nátoku s ohledem na rovnoměrnost rychlostního pole před tlakovou částí nátoku se předběžně jeví jako vyhovující. Tvar zvoleného dělicího pilíře a umístění dvojice usměrňujících křídel se ukázalo jako vhodné.

Vlivem pulzací a turbulencí, které se ve výpočtech vyskytovaly, vyvstala nutnost danou problematiku řešit podrobněji na základě měření reálného stavu či fyzikálního modelového měření. Díky tomu by následně bylo možné numerický model nakalibrovat. Z důvodu velké časové náročnosti při nastavení jednotlivých modelovaných situací, vlastních výpočtů ve FLOW-3D a neznalosti uvedených měření byl v diplomové práci zpracován v každé části pouze jeden vhodně zvolený reprezentativní zatěžovací stav. V opačném případě by byla nutnost výsledky vyhodnotit statisticky, na což již nebyl prostor, ale může být v rámci další práce. Výpočet jedné simulace se pohyboval v rozmezí jednoho až třech týdnů, v závislosti na množství výpočtových

elementů. Za tuto dobu se již dal simulovaný děj považovat za ustálený. Po dokončení simulace následovala kontrola výsledků a případná oprava nastavení modelu znamenala nový začátek výpočtu.

Pro obecné vyhodnocení vlivu výstavby nové MVE Klecany II na stávající plavbu by bylo nutné simulovat více variant výpočtu za různých průtokových stavů a manipulací na jezu. Stejná situace nastává i v případě posouzení tvaru nátoku. Pro podrobnější analýzu vhodnosti navržených konstrukcí by bylo vhodné modelovat několik dalších stavů společně s ohledem na možnost různého souběhu instalovaných turbínových soustrojí. Modely jako takové jsou nachystané a lze na nich případně provést upřesňující výpočty.

Pokud by došlo v budoucnu k prohloubení plavebního kanálu s cílem zvýšení dovolené plavební hloubky dle požadavků příslušné IV. plavební třídy, směrové vektory proudění a jejich velikosti by se mohly změnit a tyto simulované stavy by již nemusely být reprezentativní a korektní. Přesto však lze předpokládat, že případné prohloubení by vedlo ke zlepšení situace.

Práci s programem FLOW-3D a jeho modifikací FlowSight pro zpracování výsledků bych zhodnotil jako náročnou jak po stránce časové, tak zkušenostní. Složitější simulace větších modelů trvají týdny. Přestože při prvotních výpočtech je snaha o zadání větších buněk pro rychlejší řešení, bylo nutné jednotlivé modely spouštět mnohokrát. Dále bych rád zmínil náročnost na výpočetní techniku. Tato okolnost velmi souvisí se zmiňovanou časovou náročností. Pro řešení obsáhlejších modelů, od kterých čekáme relevantní výsledky, se četnosti buněk pohybují v desítkách milionů. To je umocněno délkou výpočtu do ustáleného stavu. Po dokončení výpočtů získáváme balíky dat o desítkách gigabajtů. To vyžaduje mnohdy ke slušné práci superpočítač. Zpracovávání výsledků těchto velikostí na běžném notebooku bylo tedy velmi složité.

Pro doplnění uvádím použitou výpočetní techniku. Z důvodu nestability VPN připojení na fakultní síť a přístupu k licenci pro FLOW-3D byl výpočet proveden přímo v budově fakulty. Veškeré výpočty byly uskutečněny na serverech ve virtualizaci RHEL s procesorem Intel Xeon E56xx obsahujícím 8 sdílených jader a operační paměti 16 GB RAM. Uvnitř virtuálního systému byl nainstalován Windows 10 64bit build 1709. Disk byl vytvořen NAS o velikosti 500 GB. Výsledky byly zpracovány na notebooku Lenovo IdeaPad Flex 2 Pro15 s procesorem Intel Core i7 4510U Haswell s grafickou kartou NVIDIA GeForce GT 840M, operační paměti 8 GB RAM, operačním systémem Windows 8.1 a SSHD uložištěm o velikosti 1000 GB.

Při práci v programu FLOW-3D jsem se naučil mnoho nového a přínosného do budoucna. Při práci s jakýmkoliv výpočetním softwarem bych doporučil důmyslnou kontrolu výsledných výstupů a dopředu si vždy promyslet, jak by se asi daný jev mohl chovat.

## 11. Zdroje:

### 11.1. Podklady

- Textové
  - [A1] - Manipulační řád Klecany I – Roztoky (AQUATIS a.s., 2003, .pdf)
  - [A2] - Souhrnná technická zpráva MVE Klecany II (AQUATIS a.s., 2016, .docx)
- Výkresové
  - [B1] - Půdorysy MVE Klecany I (AQUATIS a.s., 2001, .dwg)
  - [B2] - Příčné a podélné řezy MVE Klecany I (AQUATIS a.s., 2001, .dwg)
  - [B3] - Půdorysy MVE Klecany II (AQUATIS a.s., 2016, .dwg)
  - [B4] - Příčné a podélné řezy MVE Klecany II (AQUATIS a.s., 2016, .dwg)
  - [B5] - Situace nadjezí (AQUATIS a.s., 2004, .dwg)
  - [B6] - Příčné řezy toku (AQUATIS a.s., 2004, .dwg)
  - [B7] - Geodetické zaměření situace plavebního kanálu (AQUATIS a.s., 2016, .dwg)
  - [B8] - Naskenovaný reliéf dna toku koryta (Povodí Vltavy, s.p., 2016, .dwg)
- Mapové
  - [C1] - Ortofotomapa (WMS – Web Map Service)
  - [C2] - Základní mapa (WMS – Web Map Service)
  - [C3] - DIBAVOD (Digitální báze vodohospodářských dat)
  - [C4] - Mapa SPS (On-line Plavební mapy České republiky)

### 11.2. Literatura

[D1] - Vltavská vodní cesta: Vodní dílo Klecany. *Povodí Vltavy* [online]. Povodí Vltavy, státní podnik, 2013 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vltavska-vodni-cesta/vodni-dilo-klecany>.

[D2] - MVS: Montážní a výrobní sdružení spol. s.r.o. *Jez Klecany* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.mvs-walter.cz/reference/jez-klecany.html>.

[D3] - Zdymadlo Klecany. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Zdymadlo\\_Klecany](https://cs.wikipedia.org/wiki/Zdymadlo_Klecany).

[D4] - *VD Vrané nad Vltavou* [online]. Povodí Vltavy, státní podnik, 2013 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>.



- [D5] - LORENC Václav. Posouzení kapacity koryta. Brno, 2016. 82 s., 34 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. David Duchan, Ph.D.
- [D6] - Dolní Vltava. *Plavba* [online]. Sdružení JODI, 2001 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [http://www.plavba.cz/cz/cesty/vlt\\_d.html](http://www.plavba.cz/cz/cesty/vlt_d.html).
- [D7] - Vyhláška č. 67/2015 Sb.: Vyhláška o pravidlech plavebního provozu (pravidla plavebního provozu). Ministerstvo dopravy. 2015.
- [D8] - Vyhláška č. 222/1995 Sb.: Vyhláška Ministerstva dopravy o vodních cestách, plavebním provozu v přístavech, společné havárii a dopravě nebezpečných věcí. Ministerstvo dopravy. 1995.
- [D9] - KOZUBÍKOVÁ, M. 2008. Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX, VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [D10] - JANDORA, Jan. Matematické modelování ve vodním hospodářství, VUT v Brně, 2008.
- [D11] - ŘÍHA, Jaromír. Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. Brno: PC-DIR, spol. s r.o., 1997.
- [D12] - Metoda konečných prvků (MKP). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_konečných\\_prvků](https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků).
- [D13] - STUDNIČKA, Tomáš. Matematické modelování odlehčovacích komor na stokových sítích. Brno, 2013. 116 str. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí disertační práce Ing. Petr Prax, Ph.D.
- [D14] - BARKHUDAROV, M., 2004. Lagrangian VOF advection Method for FLOW-3D. Flow Science Inc. Technical Note, FSI-03-TN63R.
- [D15] - J. JANDORA a J. ŠULC, HYDRAULIKA, Brno: Akademické nakladatelství CERN, 2006.
- [D16] - GABRIEL, Pavel a Vladimír MEDŘICKÝ. Navrhování plavebních stupňů: Komplexní projekt hydrotechnika. ČVUT v Praze, 1988.
- [D17] - GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. Malé vodní elektrárny. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.

## Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Tabulka m-denních průtoků neovlivněných – období 1931–1980 [A1].....	- 34 -
Tabulka 2 - Tabulka m-denních průtoků ovlivněných – období 1956–1990 [A1] .....	- 35 -
Tabulka 3 - Tabulka N-letých průtoků $Q_N$ [A1].....	- 35 -
Tabulka 4 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 1 .....	- 64 -
Tabulka 5 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 2 .....	- 64 -
Tabulka 6 - Porovnání stávajícího a plánovaného stavu v bodu 3 .....	- 64 -
Tabulka 7 - Přehledné porovnání stávajícího a plánovaného stavu ve všech bodech.....	- 65 -

## Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Spojitost proudu v elementárním hranolu [D10].....	- 16 -
Obrázek 2 - Složky napětí působící na stěny rovnoběžné s rovinou yz [D10].....	- 17 -
Obrázek 3 - Hodnoty objemové frakce vody při použití VOF (volná hladina) [D14].....	- 22 -
Obrázek 4 – Situace širších vztahů [C2] .....	- 23 -
Obrázek 5 - Popis zdymadla s vyznačeným směrem proudění [C1].....	- 24 -
Obrázek 6 - Vodní cesta – úsek Dolní Vltavy [D6] .....	- 24 -
Obrázek 7 - Instalace ocelového hradlového provizorního hrazení v pravém poli [D2] .....	- 26 -
Obrázek 8 - Pohled na plavební komory s vyznačeným směrem proudění [C1].....	- 28 -
Obrázek 9 - Poproudní pohled na velín a uzavřená střední vrata mezi plavebními komorami [D3] .....	- 29 -
Obrázek 10 - Stěna vtokového objektu MVE Klecany II [B4] .....	- 32 -
Obrázek 11 - Zpracování zaměřených dat v MS Excel.....	- 37 -
Obrázek 12 - Import souřadnic bodů příčných profilů do programu ArcMap [C1] .....	- 38 -
Obrázek 13 - Export dat do programu Civil 3D.....	- 38 -
Obrázek 14 - Vytvoření TIN povrchů v programu Civil 3D. Modře je zobrazen povrch koryta toku a červeně povrch plavební komory. ....	- 39 -
Obrázek 15 - Podklad připravený v Civil 3D pro export do programu Blender .....	- 40 -
Obrázek 16 - Obrázek z prostředí Blender ve fázi modelování .....	- 40 -
Obrázek 17 - Vytvořený výpočtový model stávajícího stavu (bez MVE Klecany II) .....	- 41 -
Obrázek 18 - Vytvořený výpočtový model s novou MVE Klecany II.....	- 41 -
Obrázek 19 - Detail nátoků na obě MVE.....	- 42 -
Obrázek 20 - Hledání okrajové podmínky do 3D výpočetního modelu [C1], [C2] (červeně zobrazen 3D model, modře osy pomocného souřadného systému pro 3D model, fialově dílčí mesh s hledaným směrovým vektorem okrajové podmínky).....	- 43 -
Obrázek 21 - Doplnění naskenovaného reliéfu dna zaměřenými příčnými profily (vlevo stav před doplněním zaměřených profilů, vpravo opravený povrch, modře zobrazen TIN, barevně zobrazeny vrstevnice po 1 m).....	- 44 -
Obrázek 22 - Zobrazení 2D a 3D výpočetních oblastí [C1], [C3] .....	- 45 -
Obrázek 23 - Naimportovaný rastr v programu HEC-RAS se zadanou 2D výpočtovou oblastí (fialově) .....	- 46 -
Obrázek 24 - Nastavení výpočtu v programu HEC-RAS .....	- 47 -
Obrázek 25 - Hledaný směr vektoru proudění vody v korytě [C1], [C3] .....	- 48 -

Obrázek 26 - Souřadné systémy 2D a 3D modelu s určením směru vektoru okrajové podmínky ..	49 -
Obrázek 27 - Směrový vektor okrajové podmínky v axonometrii .....	- 49 -
Obrázek 28 - Rozdělení na výpočtové meshe v programu FLOW-3D (stávající varianta) .....	- 51 -
Obrázek 29 - Schematizace nastavení okrajových podmínek v programu FLOW-3D .....	- 52 -
Obrázek 30 - Výpočtový mesh s okrajovými podmínkami v programu FLOW-3D .....	- 52 -
Obrázek 31 - Nastavení okrajových podmínek v programu FLOW-3D pro první (fialový) výpočtový mesh.....	- 53 -
Obrázek 32 - Rozdělení na výpočtové meshe v programu FLOW-3D (plánovaná varianta) ..	- 56 -
Obrázek 33 - Stávající stav v Blenderu po exportu do formátu .stl (nahore editační mód, dole objektový mód) .....	- 57 -
Obrázek 34 - Plánovaný stav v Blenderu po exportu do formátu .stl (nahore editační mód, dole objektový mód) .....	- 58 -
Obrázek 35 - Nastavení okrajových podmínek stávajícího stavu včetně výpočtových meshů	- 59 -
Obrázek 36 - Nastavení okrajových podmínek nového stavu včetně výpočtových meshů .....	- 60 -
Obrázek 37 - Zobrazení meshů s ohledem na hustotu a velikost výpočtových buněk.....	- 60 -
Obrázek 38 - Ortofotomapa s vyznačeným směrem proudění, trasou plavební cesty a příčnou rychlostí [C4].....	- 62 -
Obrázek 39 - Ortofotomapa s vyznačenými směry plavby (červeně), zvolenými řešenými body (zeleně) a lokálním SS (modře) [C1], [C4] .....	- 63 -
Obrázek 40 - Přítok do jezové zdrže v závislosti na času simulace .....	- 66 -
Obrázek 41 - Přepad přes jezovou konstrukci v závislosti na času simulace .....	- 66 -
Obrázek 42 - Průtok MVE Klecany I v závislosti na času simulace.....	- 67 -
Obrázek 43 – 3D proudnice na stávajícím nátoku s vyznačením rychlostí a hydrostatickým tlakem v místě řezu v nadjezí .....	- 67 -
Obrázek 44 - Příčné řezy ve stávajícím nátoku 3D .....	- 68 -
Obrázek 45 - Protiproudni pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 13 m od dělicího pilíře .....	- 68 -
Obrázek 46 - Protiproudni pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 8 m od dělicího pilíře .....	- 69 -
Obrázek 47 - Protiproudni pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 3 m od dělicího pilíře .....	- 69 -
Obrázek 48 - Podélný řez stávajícím nátokem .....	- 70 -
Obrázek 49 - Přítok do jezové zdrže v závislosti na času simulace .....	- 71 -
Obrázek 50 - Přepad přes jezovou konstrukci v závislosti na času simulace .....	- 71 -

---

Obrázek 51 - Průtok MVE Klecany I v závislosti na času simulace.....	- 72 -
Obrázek 52 - Průtok MVE Klecany II v závislosti na času simulace .....	- 72 -
Obrázek 53 – 3D proudnice na stávajícím a novém nátoku s vyznačením rychlostí a hydrostatickým tlakem v místě řezu v nadjezí .....	- 73 -
Obrázek 54 - Detail 3D proudnic na obou nátocích (proudnice obarveny dle rychlostí proudění a řez tokem dle hydrostatického tlaku) .....	- 73 -
Obrázek 55 - Řezy jednotlivými nátoky společně s detailem 3D proudnic nového nátoku na MVE Klecany II.....	- 74 -
Obrázek 56 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 13 m od tlakové části nátoku.....	- 75 -
Obrázek 57 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 8 m od tlakové části nátoku.....	- 75 -
Obrázek 58 - Protiproudání pohled na rychlostní pole v příčném řezu stávajícího nátoku ve vzdálenosti 3 m od tlakové části nátoku.....	- 76 -
Obrázek 59 - Podélný řez stávajícím nátokem.....	- 76 -
Obrázek 60 - Podélný řez novým nátokem .....	- 77 -

## Seznam použitých zkratek a symbolů:

MVE	malá vodní elektrárna
DMT	digitální model terénu
2D	dvojměrný
3D	trojměrný
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers – River Analysis System
WMS	Web Map Service
SS	Souřadný systém
JTSK	Jednotná trigonometrická síť katastrální
MKP	Metoda konečných prvků
MKD	Metoda konečných diferencí
MKO	Metoda konečných objemů
ZZH	Zákon zachování hmotnosti
TIN	Triangulated Irregular Network
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
CFD	Computational Fluid Dynamics
VOF	Volume of Fluid
ČSN	Česká státní norma
FAST	Fakulta stavební
VUT	Vysoké učení technické
ŽB	železobeton
ss	stávající stav
ps	plánovaný stav
s. r. o.	Společnost s ručením omezeným
s. p.	Státní podnik
$v_i$	složka rychlosti [m/s]
$v$	střední průřezová rychlost [m/s]
$x_i$	prostorová souřadnice [m]
$\rho$	hustota vody [kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	tlak [Pa]
$T$	teplota [°C]
$t$	čas [s]

---

$\sigma_{ij}$	tenzor napětí [Pa]
$f_i$	složka vektoru objemového zatížení [-]
$\delta_{ij}$	Kroneckerovo delta [-]
$\varepsilon_v$	rychlost objemového přetvoření [-]
$\varepsilon_{ij}$	tenzor rychlosti přetvoření [-]
$\lambda$	součinitel rychlosti objemu přetvoření [-]
$\mu$	součinitel dynamické viskozity [-]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
R	hydraulický poloměr [m]
Q	průtok [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>N</sub>	N-letý průtok [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>30d</sub>	třicetidenní průtok [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>1</sub>	jednoletý průtok [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>2</sub>	dvouletý průtok [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>100</sub>	stoletý průtok [m <sup>3</sup> /s]