

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STAVEBNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2021**

**ROMAN  
ADAIGUZHIYEV**



# VYUŽITÍ MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ V BAZÉNECH

USE OF MATHEMATICAL MODELING IN SWIMMING POOLS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

AUTOR PRÁCE:

Roman ADAIGUZHIEV

VEDOUCÍ PRÁCE:

doc. Ing. Bohumil Šťastný, Ph.D.

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Adaiguzhiyev Jméno: Roman Osobní číslo: 438122  
Zadávací katedra: Katedra zdravotního a ekologického inženýrství  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využití matematického modelování v bazénech.

Název diplomové práce anglicky: Use of mathematical modeling in swimming pools.

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury k dané tématice. Experimentální měření. Modelování. Vyhodnocení dat. Závěry a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

Kolář V., a kol.: Hydraulika. Praha: SNTL, 1983,

Sklenář J.: Balneotechnika II. Praha: ČVUT, 1992, ISBN 80-01-008006-1

Melichar J., Úvod do čerpací techniky. Praha: ČVUT, 2012, ISBN 9788001050569

Šťastný B. Stavba a provoz bazénů, Praha: ABF, 2006

ČSN EN ISO 14414

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Bohumil Šťastný, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 22.09.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 03.01.2021  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou prací na téma "*Využití matematického modelování v bazénech*" vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Bohumila Šťastného, Ph.D. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Praze dne: 23.05.2021

.....  
Roman Adaiguzhiyev



**FAKULTA  
STAVEBNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Bohumilu Šťastnému, Ph.D. a panu Ing. Filipu Horkému, Ph.D. za podnětné rady, věcné připomínky, poskytnutou literaturu, ochotu a trpělivost při psaní této práce.

V Praze dne: 23.05.2021



Název práce: Využití matematického modelování v bazénech  
Autor: Roman Adaiguzhiyev  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby  
Katedra: Katedra zdravotního a ekologického inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohumil Šťastný Ph.D.  
E-mailová adresa: [stastny@fsv.cvut.cz](mailto:stastny@fsv.cvut.cz)

## ČLENĚNÍ PRÁCE

Svým obsahem táto Diplomová práce částečně navazuje na teoretickou část Bakalářské práce „*Využití nástrojů CFD při optimalizaci cirkulace vody v plaveckých bazénech*“ a bude uvedena i v rámci Diplomové práce.

Celkem je práce členěna do 8 hlavních kapitol. Nejdříve je vytyčen hlavní cíl práce, k němuž práce směřuje. Úvodní kapitola shrnuje podstatná fakta a skutečnosti v oblasti hydrauliky bazénů a zmiňuje motivaci pro studium s využitím nástrojů výpočetní dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics – zkráceně CFD).

Po stručném úvodu následuje popis použitých nástrojů a metod řešení a způsoby aplikace. V aplikační části je uveden soupis základních variant modelovaných situací ve vztahu k hydraulice plavecké části bazénu. Navazující části práce ukazují konkrétní aplikaci nástrojů CFD pro jednotlivé dispozice bazénu, proces získání potřebných informací a naznačení způsobů posouzení dílčích výsledků.

Další část práce je zaměřená hlavním způsobem na podrobný popis přípravy a realizace měrné kampaně „insitu“. Úlohou této částí je poskytnout co nejjasnější představu o skutečném provedení měření rychlostí kontrolních bodů v reálném bazénu.

Závěrem této práce je provedeno celkové shrnutí výsledků, posouzení a porovnání matematického modelu a jeho skutečného prototypu, zda ověření predikčního modelu se podařilo úspěšně či ne, do jaké míře byla dosáhnuta shoda a jaké úpravy modelu je potřeba provést pro dosažení lepší shody nebo pro vyhnutí se odchylkám. Na závěr je uvedeno vyhodnocení celé práce.

## OBSAH

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| PROHLÁŠENÍ .....                                                             | 3  |
| PODĚKOVÁNÍ.....                                                              | 4  |
| ČLENĚNÍ PRÁCE .....                                                          | 6  |
| OBSAH .....                                                                  | 7  |
| 1. STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE .....                                                | 9  |
| 2. ÚVOD.....                                                                 | 10 |
| 3. Recirkulační systém úpravy bazénové vody.....                             | 12 |
| 3.1. Legislativa .....                                                       | 13 |
| 3.2. Výměnný systém .....                                                    | 15 |
| 3.2.1. Hydraulika výměny a směšování vody v bazénu .....                     | 16 |
| 3.2.2. Vliv rozmístění míst vtoků a výtoků v bazénu .....                    | 22 |
| 3.2.3. Intenzita recirkulace .....                                           | 24 |
| 3.2.4. Rozměry a tvar bazénu, vliv kapacity recirkulačních úpraven vody..... | 25 |
| 4. PRAKTICKÁ ČÁST, MĚŘENÍ ZÁJMOVÝCH RÝCHLOSTNÍCH BODŮ .....                  | 26 |
| 4.1.1. Lokalita .....                                                        | 26 |
| 4.1.2. Technologické vybavení .....                                          | 27 |
| 4.1.2.1. Bazénová nádrž .....                                                | 27 |
| 4.1.2.2. Úpravna vody .....                                                  | 29 |
| 4.1.3. Použité přístroje pro měření .....                                    | 33 |
| 4.1.3.1. Geometrie .....                                                     | 33 |
| 4.1.3.2. Rychlostní profily.....                                             | 35 |
| 4.1.4. Postup a výsledky měření.....                                         | 38 |
| 4.1.4.1. Geometrie .....                                                     | 38 |
| 4.1.4.2. Zájmové body .....                                                  | 39 |
| 5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....                                           | 40 |
| 6. CFD ANALÝZA .....                                                         | 47 |
| 6.1. Pojem CFD .....                                                         | 47 |
| 6.2. Základní principy CFD .....                                             | 47 |
| 6.3. Postup řešení.....                                                      | 48 |
| 6.4. Stručný popis některých používaných metod .....                         | 48 |
| 6.4.1. Metoda konečných rozdílů.....                                         | 48 |
| 6.4.2. Metoda konečných objemů .....                                         | 48 |
| 6.4.3. Metoda konečných prvků.....                                           | 50 |
| 6.5. Model turbulence.....                                                   | 50 |



|        |                                      |    |
|--------|--------------------------------------|----|
| 6.6.   | Příprava geometrii k modelování..... | 51 |
| 6.6.1. | Tvorba modelu .....                  | 51 |
| 6.6.2. | Výpočetní síť.....                   | 54 |
| 6.7.   | Parametry modelu.....                | 58 |
| 6.8.   | Okrajové podmínky .....              | 60 |
| 6.9.   | Výpočet .....                        | 64 |
| 6.10.  | Přehled výsledků .....               | 66 |
| 7.     | POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....              | 70 |
| 7.1.   | Porovnání .....                      | 70 |
| 7.2.   | Posouzení shody.....                 | 51 |
| 8.     | ZÁVĚRY .....                         | 76 |
|        | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....      | 77 |
|        | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....        | 77 |
|        | SEZNAM OBRAZKŮ .....                 | 78 |
|        | SEZNAM TABULEK .....                 | 80 |
|        | SEZNAM ROVNIC .....                  | 81 |
|        | PŘÍLOHY.....                         | 82 |
|        | FOTODOKUMENTACE.....                 | 82 |
|        | DOSLOV .....                         | 88 |

## 1. STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Předložená diplomová práce se zaměřuje především na ověření předem vytvořeného predikčního modelu reálného plaveckého bazénu, obsahující řádu informací o směru, velikosti a charakteru proudění vody tělesem tohoto bazénu od míst dotace až po místa odběru ze tělesa bazénu.

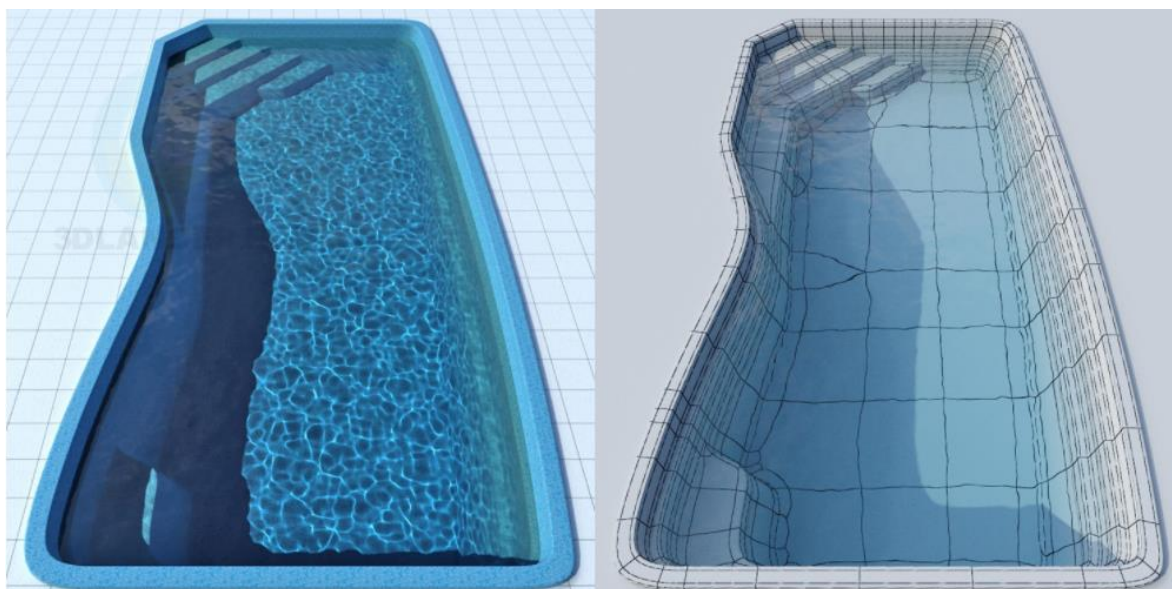
Toto ověření, po provedení skutečného měření bazénu-prototypu, musí dát jednoznačnou odpověď na otázku "Odpovídá-li matematický model skutečnosti a v jaké míře, či výchozí předpoklad vyžaduje opravu nebo následnou kalibraci".

Pro ověření budou porovnány tzv. zájmové body a rychlostní poli, stanovené v předem zhotoveném matematickém modelu s body ve stejných místech ve skutečném prototypu. Pro porovnání jsou použity především informace o rychlostech proudění v těchto bodech.

## 2. ÚVOD

Proudění vody v bazénu a úprava vody patří k základním podmínkám pro udržení čisté vody v bazénu. Zároveň se tak brání rozvoji nežádoucích organismů ve vodě a na vnitřním povrchu bazénu, které mohou vytvořit slizký povrch a způsobit zakalení vody. Dobře navržená hydraulika plavecké části bazénu zajišťuje optimální rozdělení desinfekčních činidel a přiváděné filtrované vody v celém objemu bazénu. Riziko zhoršení kvality vody, rozvoje řas a mikroorganismů volně rozptýlených v bazénové vodě i ulpělých na povrchu dna a stěnách bazénu se tím více snižuje, čím se v objemu bazénu nachází méně mrtvých zón (Pokus o detekci a způsob eliminace mrtvých zón je popsán v rámci Bakalářské práce). Při stagnaci proudění vody v určité části objemu bazénu dojde i k výraznému zhoršení hygienického zabezpečení vody omezeným přísunem desinfekčních činidel. Čím delší dobu zůstává voda bez výměny v klidu, tím snadněji se mohou mikroorganismy udržovat volně ve vznosu nebo ulpívat na povrchu bazénu. Tím mohutnější bude i jejich rozvoj a nesnadněji se budou odstraňovat z bazénu a následně mohou představovat závažné hygienické a zdravotní riziko pro uživatele bazénu.

Nejdůležitější částí recirkulačního systému (technologické linky) při úpravě bazénových vod je bazénová nádrž. Konkrétně způsob vtoku upravené vody a odtoku znečištěné vody, a směšování tzn. u výměnného systému nádrže (hydraulický systém).



Obrázek 1: Bazénová nádrž [1] – 3dlancer.net

Na návrhu vtoku a odtoku vody z bazénu závisí celková aktuální kvalita vody, tj. kvalita vody v každém časovém okamžiku proudu v bazénu.

Z toho důvodu musí být návrh vtokových míst (počet, tvar, jmenovitý průtok) a návrh odtoku uzpůsoben tak, aby docházelo k nedokonalé výměně vody v nádrží a dokonalému směšování přiváděné vody a vod v bazénu, tj. nevznikali mrtvé zóny.

O výskytu mrtvých zón a oblasti z horší cirkulaci či výměny vody v bazénu se lze dozvědět, buď během provozu bazénu, během provedené zkoušky anebo z výstupů matematických modelů.

Nejlevnější a nejmíň pracná sanace je právě u matematických modelů, tj. jejich skutečných prototypů. Ale takové modely, pro použití při řešení reálných problémů, vyžadují ověřenou míru spolehlivosti, aby chování matematického (a jakéhokoliv jiného nereálného modelu potřebného pro imitování skutečných jevů) modelu, co nejlépe odpovídalo realitě.

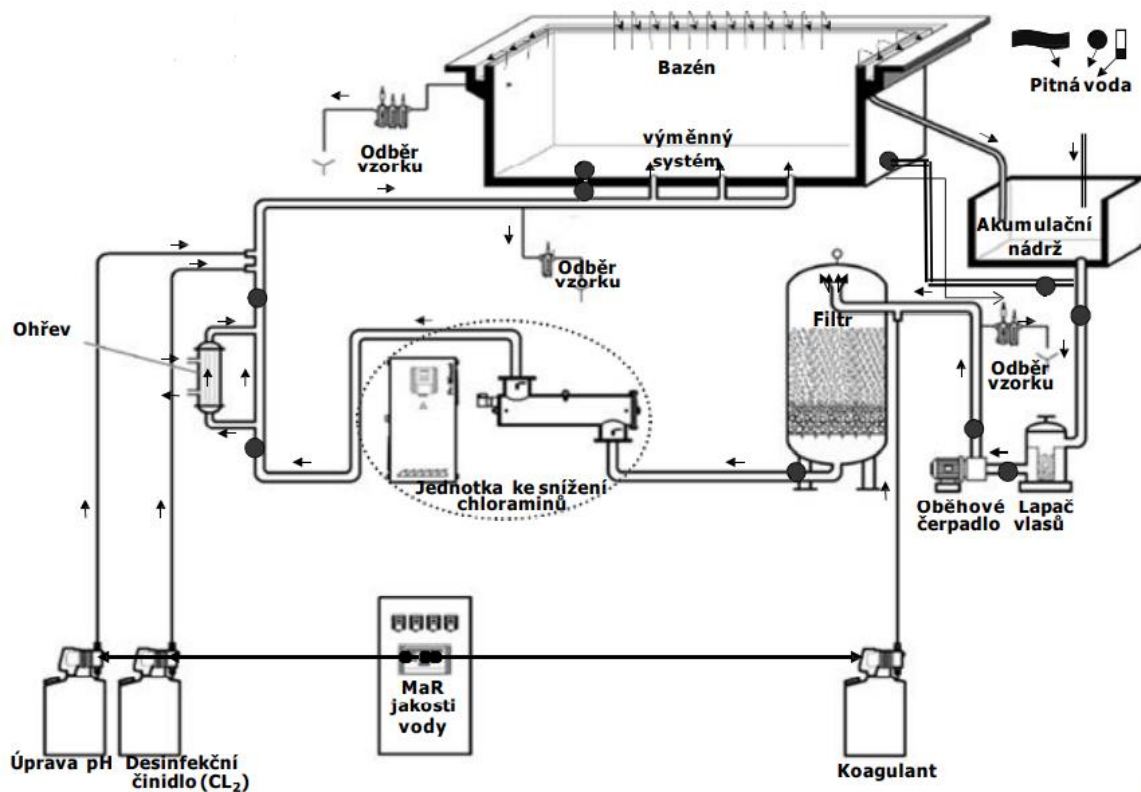
Toto ověření provedeme pomocí několika vstupních podmínek:

- 1) Dodržení hlavních geometrických a kvalitativních parametrů při vytvoření matematického modelu;
- 2) Dodržení stejných okrajových podmínek v modelu a ve skutečnosti při měření;
- 3) Stanovení míst/bodů v bazénu potřebných pro následné ověření během měrné kampaně;
- 4) Provedení samotného měření dřív stanovených bodů;
- 5) Porovnání naměřených dat s výstupem z modelu.
- 6) Vyhodnocení dosažené shody nebo odchylky pro každý bod a vcelku.

Správně navrhovaný a ohodnocený model poskytuje spolehlivou informaci o chování reálného prototypu a umožňuje předpověď různých druhů reakcí na určité zásahy a změny.

### 3. Recirkulační systém úpravy bazénové vody

Recirkulační systém úpravy bazénové vody se skládá z jednotlivých částí, které zajistí požadovanou kvalitu vody danou právními předpisy. Jednotlivé části jsou obsaženy v technologickém schématu úpravy bazénových vod, viz obr.2.



Obrázek 2: Schéma úpravy bazénové vody [2] – Doc. Ing. B. Šťastný, Ph.D. YMIB přednáška 9 - Stavba a provoz bazénů.

Přičemž nejdůležitější částí je bazénová nádrž a její výměnný systém. K hlavním částem patří:

- Nádrž bazénu;
- Akumulační jímka;
- Čerpadlo s lapačem vlasů;
- Systém filtrace
- Ohřev
- Chemické hospodářství

### 3.1. Legislativa

Při řešení jakékoliv problematiky související s objektem určenému k veřejnému provozování musíme sledovat příslušné národní (nadnárodní) zákony a směrnice. U veřejných plaveckých bazénů, kde se jedná v souvislosti s provozováním o otázku zdravotních rizik v důsledku hygienických závad, jde zejména o související legislativu v oblasti působnosti rezortu zdravotnictví.

Návrh veřejného bazénu musí být proveden v souladu s platnou vyhláškou MZ číslo 238/2011 Sb. „*Vyhláška o stanovení hygienických požadavků na koupaliště, sauny a hygienické limity písku v pískovištích venkovních hracích ploch*“ ve znění pozdějších předpisů a s ostatními navazujícími předpisy.

Dále jsou uvedeny odstavce z této vyhlášky týkající se přítoku a výměny vody v bazénech:

*„Výklad pojmů*

*Pro účely této vyhlášky se rozumí*

...

*c) recirkulovanou vodou se myslí voda, která po opuštění bazénu prochází recirkulační úpravnou a po případném smíšení s ředící vodou se vrací zpět do bazénu; ředící voda musí být do systému přivedena tak, aby bezprostředně prošla recirkulační úpravnou,*

*d) upravenou vodou se myslí voda před vstupem do bazénu, která byla upravena včetně dezinfekce a ohřevu,*

*e) recirkulační úpravnou vody se myslí systém technologických kroků, který zahrnuje alespoň mechanickou filtraci pro zachycení hrubých nečistot, pokud ji neobsahuje jiný stupeň úpravy, koagulaci nebo jiný technologický stupeň úpravy, odstraňující zejména koloidní látky, pískovou filtraci nebo filtraci na jiném vhodném médiu, dezinfekci a dopravní systém vody mezi bazénem, technologickými prvky a bazénem,“ [3] Vyhláška č. 238/2011 Sb., Část první §1*

*„Hygienické požadavky na plavecké a koupelové bazény*

...

*(3) V soustavě bazénů nesmí být voda přepouštěna přímo z bazénu do bazénu. Za přepouštění se nepovažují vodní atrakce, u kterých voda v soustavě bazénů přepadává z bazénu do bazénu, a soustava bazénů napojená na jednu úpravnu, pokud je do každého bazénu zajištěn samostatný přítok upravené vody. Přívod upravené vody z recirkulační úpravy musí být pro každý bazén samostatný. Pokud nebude každý den prováděn odečet ředící vody a zjištěná hodnota zaevidována do provozního deníku, musí být pro přívod ředící vody navržen a instalován samostatný registrační vodoměr nebo průtokoměr s registrací proteklého množství vody.*

(4) Bazén i akumulární jímka musí být v nejhlubším místě opatřeny vypouštěcím zařízením, aby bylo možno vypustit vodu z bazénu (jímky) do kanalizace, vodoteče nebo do příslušného odvodňovacího systému podle jejich připojovacích podmínek, a to po dohodě s jejími správci. Musí být zajištěna možnost nárazové dezinfekce veškerého zařízení i bazénové vody.“ [4] Vyhláška č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §17

„ ...

(2) Přelivné žlábký, stěny bazénu a dno bazénu musí být neporušené a snadno čistitelné a musí být mechanicky čištěny tak, aby byly trvale bez stop znečištění nebo nárostů řas.“ [5] Vyhláška č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §20

„Recirkulace, úprava a dezinfekce vody

(1) Technologie a kapacita recirkulační úpravny vody a její provoz musí zajišťovat splnění ukazatelů jakosti bazénové vody stanovené přílohou č. 8 k této vyhlášce.

(2) Recirkulační systém musí být navržen a proveden tak, aby veškerá voda ze systému mohla být vypuštěna do kanalizace či příslušného odvodňovacího systému. Zařízení recirkulační úpravny vody musí umožnit snadné čištění všech svých součástí, zejména těch, které slouží k separaci znečištění z bazénové vody. Pravidelně se musí čistit zejména přelivné žlábký a akumulární nádrží. Mřížky odvodňovacích zařízení musí být odnímatelné s možností oboustranného čištění a dezinfekce. Všechny podlahové plochy v prostorách úpravny musí být vyspádovány a napojeny na kanalizaci, s výjimkou prostorů, kde jsou skladovány chemikálie a kde je s nimi manipulováno, a musí být učiněna taková opatření, aby bylo zabráněno úniku těchto látek do kanalizace.

(3) Intenzita recirkulace vody a doba zdržení vody pro plavecké a koupelové bazény se stanoví podle přílohy č. 11 k této vyhlášce; intenzita musí být automaticky kontinuálně měřena a evidována pro každý bazén zvlášť vyjma bazénů se sezónním provozem.

(4) U bazénů s recirkulační úpravnou vody musí být recirkulace včetně dezinfekce bazénové vody v provozní době nepřetržitá. V době provozního klidu může být intenzita recirkulace bazénové vody snížena, u malých bazénů i přerušena, ale do zahájení provozu musí být recirkulací či napouštěním plnicí vodou alespoň jedenkrát vyměněn celý objem bazénu. U zařízení určeného pro koupel jednoho návštěvníka lze recirkulaci po dobu koupání návštěvníka přerušit, pokud v době mezi koupáním 2 po sobě jdoucích návštěvníků bude recirkulace zapnuta alespoň tak dlouho, aby se celý objem vody v tomto bazénu nejméně jednou obměnil.

...

(8) Voda k napuštění bazénu i jeho doplňování musí procházet recirkulační úpravnou bazénové vody, pokud je koupaliště úpravnou vybaveno.“ [6] Vyhláška č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §25

### 3.2. Výměnný systém

Nejlépe je funkce, chování a fyzická podstata výměnného systému bazénové vody popsána v práci doc. Ing. Josefa Sklenáře, CSc. „*Balneotechnika I*“ r. 1981 § 3.1.4 *Výměnné systémy nádrží*, na kterou nadále výklad bude několikrát navazovat.

„Výměnným systémem v bazénech se nazývá technické zařízení, určené k realizaci přívodu a odběru vody z nádrže. Způsob dotace a odběru určuje vznik určitého druhu proudění vody v bazénu. Jak už bylo zmíněno, druh proudění má vliv na lokální a celkovou kvalitu, a proto tento vliv je třeba matematicky popsat a vyjádřit jeho funkci v naší úloze. Tuto funkci pojmenujeme  $C_n(t)$  a je obsažena v odvozených bilančních rovnicích.

Každý výměnný systém při výměně vody v bazénu způsobí vznik proudnicového pole, které má určité charakteristiky, závislé hlavně na voleném typu výměnného systému, na tvaru bazénu, na teplotě vody, vazkosti kapaliny atd.

Každý výměnný systém působí tak, že během jeho provozu vzniká v bazénu nehomogenní kvalitativní pole, jehož stupeň nehomogenity je závislý na počtu vtokových otvorů, jejich rozmístění a na způsobu odběru vody.

Tato nehomogenita, která je způsobena, například, zákalem vody v bazénu, způsobuje nerovnoměrnost spotřeby chloru v různých místech bazénu a projevuje se lokálními přechlorováním a pod-chlorováním.

Bazény musí mít zařízení pro recirkulaci a úpravu vody. Způsob přívodu a odběru vody u bazénu a musí zajišťovat, aby docházelo k důkladnému směšování vody přiváděné do bazénu z úpravny vody s vodou v bazénu. Splnění tohoto požadavku se zajišťuje dostatečným počtem vtokových a odběrných otvorů vhodně rozmístěných, aby při proudění vody nevznikaly v bazénu zkratové proudy a místa s pomalou výměnou vody, a aby výměna probíhala na krátké dráze a v celém objemu bazénu. Odběr vody z bazénu se navrhuje a provádí tak, aby byl umožněn přítok vody na úpravnu jak z úrovně hladiny, tak i ze dna bazénu, případně v kombinaci obou odběrů.

Hlavní faktory ovlivnění proudnicových polí:

1. Hydraulika výměny a směšování vody v bazénu; (viz § 3.2.1)
2. Výměnný systém – počet a rozmístění vtokových otvorů a délka odběrné přepadové hrany;
3. Intenzita recirkulace – rostoucí průtok zvyšuje nebezpečí preferenčních cest, ale naopak klesající průtok snižuje stupeň směšování;
4. Rozměry a tvar bazénu – správně navržený tvar bazénu umožní se částečně vyhnout vzniku nežádoucích mrtvých zón.
5. Ostatní méně důležité faktory (Teplota, nahodilé jevy, provozní fáze atd.)

V souhrnu, „Vhodným“ výměnným systémem lze omezit negativní faktory natolik, že proudnicové pole může mít nízký stupeň nehomogenity a vyhoví požadavkům na chlorování.“ [7] J. Sklenář „*Balneotechnika I*“ § 3.1.4

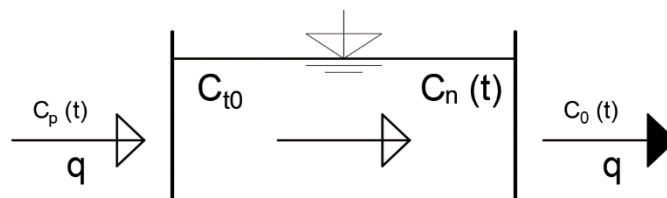


### 3.2.1. Hydraulika výměny a směšování vody v bazénu

„Pro řešení úlohy výměny a směšování vody v bazénu vylučme jevy, které se netýkají této problematiky, a to jsou napouštění, vypouštění, povypouštění, doplňování apod. Objem vody v bazénu po celou dobu výpočtu a měření uvažujeme konstantní.

Zavedeme hodnotu Absolutní kvalitativní výměny  $\psi_A$  která udává změnu kvality vody na výtoku  $C_n(t)$  oproti „vstupní“ hodnotě na vtoku do bazénu  $C_{t0}$  po nějakou dobu  $t$ . Ta je dána rozdílem:

$$\psi_A = C_{t_0} - C_n(t)$$



Rovnice 1: Absolutní kvalitativní výměna

Obrázek 3: Změna kvality vody

Tato hodnota vyjadřuje ve skutečnosti jen částečnou změnu jakostí vody za určitou dobu. Úplná výměna  $C_n(\infty)$  by teoreticky byla dosažena po čase  $t \rightarrow \infty$ . Z toho lze odvodit Relativní stupeň výměny, který je definován následujícím výrazem:

$$\psi(t) = \frac{C_{t_0} - C_n(t)}{C_{t_0} - C_n(\infty)}$$

Rovnice 2: Relativní stupeň výměny

Rov. 2 nepředstavuje ještě zcela rozvinutý tvar pro řešení. Podle obr. 3 neobsahuje parametry  $q$ ,  $C_p(t)$  a  $C_o(t)$ , které taky ovlivňují proces výměny. Jde v podstatě o to odvodit ekvivalentní výraz k rov. 2. Lze tak učinit podle obr. 3 při aplikaci principu látkové bilanci následující výraz:

$$C_{t_0} - C_n(t) = T^{-1} \int_0^t [C_o(t) - C_p(t)] dt$$

Rovnice 3: Přetvářený výraz látkové bilanci

Rozvinutý výraz pro Obecné vyjádření relativního stupně výměny vody v bazénu nabude tvaru:

$$\psi(t) = \frac{C_{t_0} - C_n(t)}{C_{t_0} - C_n(\infty)} = \frac{\int_0^t [C_o(t) - C_p(t)] dt}{T [C_{t_0} - C_n(\infty)]}$$

Rovnice 4: Obecné vyjádření relativního stupně výměny vody v bazénu“

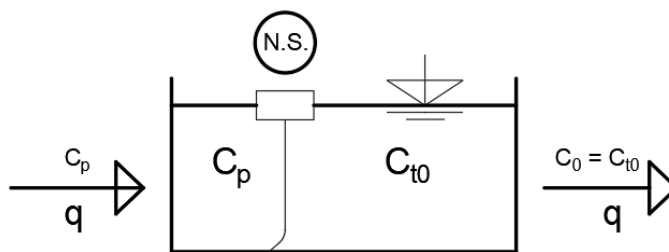
Rov. 4 je dále aplikovatelná až po konkretizaci charakteru přítokové kvality  $C_p(t)$ . Tento vstupní faktor může být pojmán buď jako konstantní,  $C_p(t) = C_f(t)$ .

Chceme-li výměnu vody specifikovat, je třeba ke každému typu výměny přiřadit relativní stupeň směšování a definovat průběh jako idealizovaný či reálný.

„Modelování“ různých typů výměn:

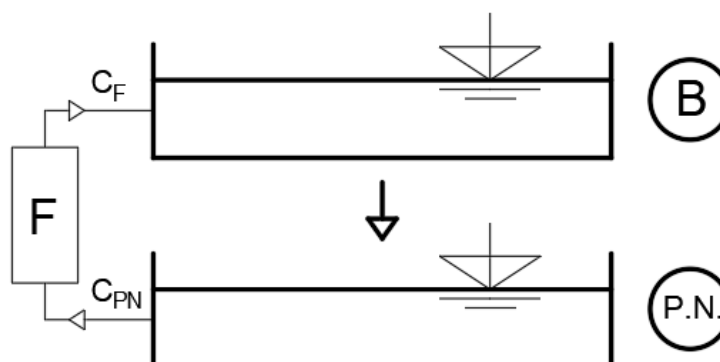
- |                                  |       |   |                       |
|----------------------------------|-------|---|-----------------------|
| a) Dokonalá výměna (pístový tok) | -     | → | $\delta = 0$          |
| b) Dokonalý zkrat                | - dsk | → | $\delta = 0$          |
| c) Dokonalé směšování            | - ds  | → | $\delta = 1$          |
| d) Skutečné směšování            | - sk  | → | $\delta : (0 \div 1)$ |

Dokonalá výměna je taková, při které původní koncentrace vody v bazénu o kapacitě  $V$  [m<sup>3</sup>] je odstraněna (vyměněna) za nejkratší možnou dobu, z nádrže t.j. za teoretickou dobu zdržení vody v bazénové komoře  $T$  [h].



Obrázek 4: Zamezení směšování nornou stěnou

Realizace tohoto typu výměny je znázorněna na obr. 4. Je charakterizována symboly  $C_0 = C_{t0}$  a  $\delta = 0$  tzn., že odtoková kvalita se rovná původní kvalitě  $C_{t0}$  v čase  $t = 0$  a že směšování kvality  $C_p$  s původní kvalitou vody v bazénu  $C_{t0}$  je nulové t.j.  $\delta = 0$ . Podle obr. 4 lze zamezit směšování buď pevným rozhraním (plovoucí norná stěna N.S.), nebo použitím přepouštěcí nádrže (P.N.) jak je znázorněno na obr. 5.



Obrázek 5: Zamezení směšování přepouštěcí nádrží

Z obr. 4 a obr. 5 je patrné, že se jedná o zařízení, které může být aplikováno pouze v době poprovozní. Abychom mohli provést komplexní rozbor různých typů výměn, popíšeme je analyticky a znázorníme graficky.

Pro analýzu použijme rov. 4 a sice levou i pravou stranu rovnice podle toho, které typy výměn budou popisovány.

Každý typ výměny má svou charakteristiku. U „dokonalé výměny“  $\psi_{dv}$  platí:  $C_0 = C_{t_0}$ , pro  $C_p(t) = D_p = k$ . Při použití pravé strany rovnice dostaneme výraz pro realizovatelný způsob výměny vody v nádrži ve tvaru:

$$\psi_{dv}(t) = \frac{C_{t_0} \int_0^t dt - C_p \int_0^t dt}{T[C_{t_0} - C_p]} = \frac{t}{T} \quad \text{Rovnice 5: Výraz dokonalé výměny}$$

- a) „Výměna dokonalá“ probíhá tedy lineárně s časem a směrnice této přímky je dána převrácenou hodnotou teoretické doby zdržení vody v nádrži  $T$ , vyjádřené např. v hodinách.

Podle obr. 6 prochází přímka charakterizující časový postup výměny počátkem a má sklon tím větší, čím je doba  $T$  kratší. Menší hodnoty  $T$  představují vyšší průtoky  $q$ . Pro  $T \rightarrow 0$  poroste  $q \rightarrow \infty$ , takže  $\psi \rightarrow 1$  odpovídá  $t = 0$  a čára průběhu výměny je totožná s osou  $y$ . Druhý extrém nastane pro  $T \rightarrow \infty$ , takže průtok  $q$  klesá k nule a v tomto extrému se čára průběhu výměny ztotožní s osou  $x$ , takže  $\psi = 0$ .

- b) „Dokonalý zkrat (idealizovaný) – ( $\psi_{dsk}$ )

Výraz  $\psi = 0$ , podle výše uvedené úvahy, odpovídá  $q = 0$ . Tentýž výraz však existuje i pro  $q \neq 0$  a tudíž i pro  $T \neq 0$  a sice pro „idealizovaný“ proudnicový zkrat, kdy podle obr. 3 bez norné stěny, odtoková kvalita se rovná kvalitě přítokové, takže „teoretický zkrat“ je definován výrazy:

$$q \neq 0 ; C_0 = C_p ; \psi_{dsk} = 0 ; \delta = 0$$

a v grafickém zobrazení je průběh výměny totožný s osou  $x \equiv t$ , při nulovém stupni směšování ( $\delta = 0$ ).

Funkcemi  $\psi_{dv} = \frac{t}{T}$  a  $\psi_{dsk} = 0$  jsme v obr. 6 vymezili plochu pro „modelování“ funkcí uvedených pod body c) a d).

- c) Výměna při dokonalém směšování – ( $\psi_{ds}$ )

Popsané způsoby výměny podle bodu a) a b) představují extrémní polohy průběhů výměn při nulovém směšování. „Pístoný tok“ představuje výměnu dokonalou, všechny ostatní jsou nedokonalé. Tyto nedokonalé výměny jsou charakterizovány určitým stupněm směšování ( $\delta \neq 0$ ).

Mezi nimi existuje jeden jediný případ, ale pouze jako „idealizovaná“ představa, nedokonalá výměna vody v bazénu s „dokonalým“ směřováním – ( $\psi_{ds}$ ). Tento způsob výměny je v praxi sice nerealizovatelný, ale slouží jako „ideální myšlenkový model“ k matematickému vyjádření průběhu výměny „idealizované“ a k představě o výměnách nedokonalých s nedokonalým směřováním po patřičné kolekci.

#### Funkce vyjádření dokonalého směšování

K analýze použijme levou stranu rov. 4. Neznáme v ní funkci  $C_n(t)$ , která představuje kvalitativní změny v bazénové komoře. Stanovme její průběh na základě látkové bilance podle diferenciálně bilanční rovnice:

$$C'_n(t) = -\frac{C_0(t)}{T} + \frac{C_p(t)}{T} \quad \text{Rovnice 6: Funkce vyjádření dokonalého směšování}$$

Máme-li stanovit průběh změn kvality vody v bazénu  $C_n(t)$  pomoci rov. 6, je třeba konkretizovat všechny její parametry. Parametr  $T$  představuje intenzitu výměny a parametr  $C_p$  definuje jednoznačně kvalitu přítoku, takže oba reprezentují specifikované výpočtové konstanty. Ke konkretizaci zbývá funkce odtokové kvality  $C_0(t)$ . Tato funkce je v daném případě charakteristikou způsobu proudění vody v bazénu, resp. způsobu výměny vody. Je to ve shodě i s předchozími případy, tj. s výměnou dokonalou s odtokovou charakteristikou  $C_0 = C_{t0}$  a ideálním zkratem kdy  $C_0 = C_p$ .

Předpokládáme-li „idealizovaně“ že uvnitř bazénu existuje „dokonalé směšování“ (míchání) v každé infinitezimální časové jednotce  $dt$ , pak lze v bazénové komoře, od času  $t = 0$  až do  $t$  t.j. v pozorovacím časovém intervalu v našich představách připustit existenci homogenního kvalitativního pole. Teoreticky to znamená, že v každém místě bazénu je stejná kvalita, ale jen v určitém čase. Jinak je kvalita funkcí času, vzhledem ke změně koncentrace, způsobované kontinuálně přítokem o kvalitě  $C_p$ . Obecně vzato může docházet ke zhoršování nebo ke zlepšování kvality  $C_n(t)$ , podle vztahu

$$C_p \begin{matrix} < \\ > \end{matrix} C_n(t)$$

V balneotechnice převážná většina případů se týká zlepšování kvality vody v bazénu vlivem filtrátu. Uvažujeme proto v dalších úvahách „ředění“. Existuje-li tedy teoreticky homogenní kvalitativní pole, c důsledku předpokládaného „dokonalého“ směšování, pak odtoková kvalita musí být rovna momentální kvalitě vody v bazénu, čili funkční charakteristikou dokonalého směšování je rovnost  $C_0(t) = C_n(t)$ .

Po této úvaze nabude rov. 6 již konkrétní formy a je řešitelná:

$$C'_n(t) = -\frac{C_n(t)}{T} - \frac{C_p}{T}$$

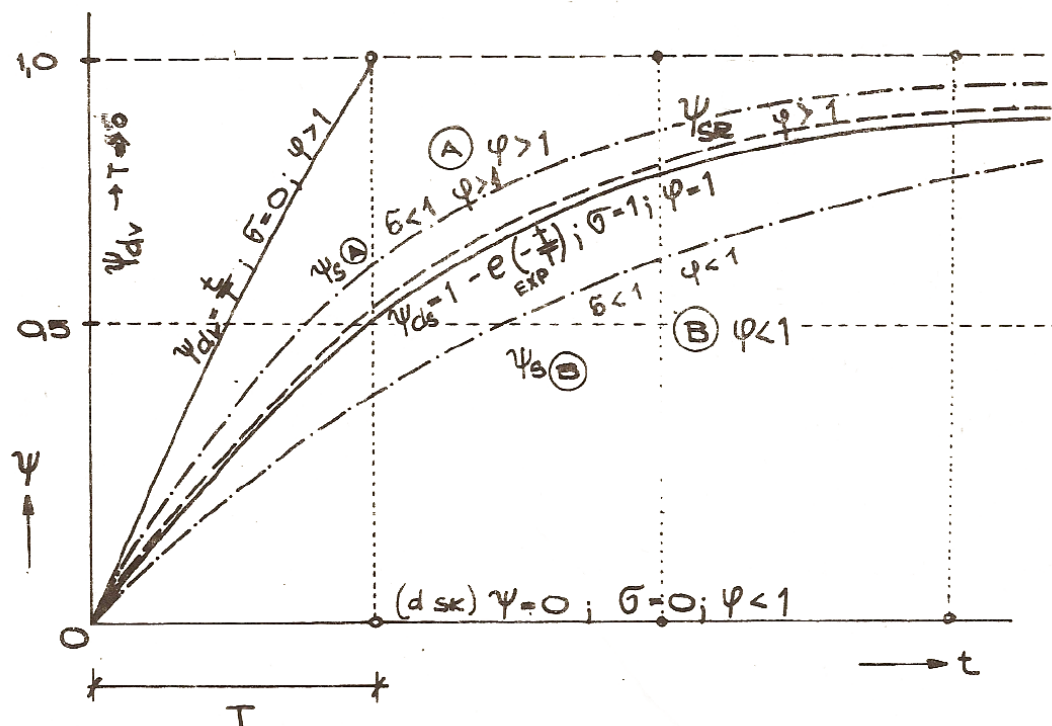
což odpovídá typu diferenciální rovnice a jejímu obecnému integrálu, takže hledaná funkce má tvar:

$$C_n(t) = (C_{t_0} - C_p)e^{-\frac{t}{T}} + C_p$$

Po dosažení do rov. 2 dostaneme funkční vyjádření pro relativní stupeň výměny vody v nádrži při dokonalém směšování:

$$\psi_{ds}(t) = \frac{C_{t_0} - (C_{t_0} - C_p)e^{-\frac{t}{T}} - C_p}{C_{t_0} - C_p} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$

Z výsledku je patrné, že tento typ výměny nezávisí na kapacitě, neboť jde o idealizovaný způsob homogenizace a závisí pouze na intenzitě výměny a je funkcí času. Pro lepší představu o průběhu výměn v čase  $t$  jsou na obr. 6 znázorněny „limitující“ funkce  $\psi_{dv}$  a  $\psi_{dsk}$  spolu s funkcí  $\psi_{ds}$ .



Obrázek 6: Znáznornění limitujících funkcí výměny vody [7] – Balneotechnika I - J. Sklenář

Z grafu je patrné, že intenzita výměny při dokonalém směšování je značně pomalejší než při dokonalé výměně. Následující tabulka udává procentuální výměnu pro pístový tok a pro dokonalé směšování

Tabulka 1: Znázornění limitujících funkcí výměny vody

|                |        |       |        |      |      |      |      |      |
|----------------|--------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| $\psi_{ds}$    | 22,1   | 39,3  | 52,8   | 63,2 | 86,5 | 95,0 | 98,2 | 99,3 |
| n. T           | 0,25 T | 0,5 T | 0,75 T | 1 T  | 2 T  | 3 T  | 4 T  | 5 T  |
| $\psi_{dv} \%$ | 25     | 50    | 75     | 100  | -    | -    | -    | -    |

Z tabulky je patrné, že z hlediska odstraňování znečištění ve vazbě na hydraulické vlastnosti nádrže, určené způsobem proudění, je dokonalá výměna nejefektivnější způsob, který se dá prakticky využít při čištění bazénových vod. Každé zařízení má však také své nevýhody. Při praktické aplikaci plovoucí normální stěna vyžaduje kontrolu a obsluhu a systém s přepouštěcí nádrží vyžaduje investici do přepouštěcí nádrže a je vázán výškovou dispozicí a vyžaduje manipulaci v poprovozní době. Naopak poskytuje výhody ve zvýšené rychlosti výměny a projevuje se buď zlepšenou kvalitou vody v nádrži nebo úsporou na elektrické energii na čerpání. Kromě toho umožňuje čištění bazénu na lepší úrovni než při použití ponorných vysavačů. Přepouštěcí nádrže se navrhuje spíše výjimečně než běžně, vzhledem ke zvýšené počáteční investici.

d) Reálná výměna (nedokonalá s nedokonalým směšováním – skutečná)

Dosud popsané způsoby výměny vody v bazénu, s výjimkou pístového toku, byly uvažovány jako idealizované modely, sloužící k ujasnění problematiky proudění vody v nádrži, limitování okrajových průběhů a členění typů proudění pro oblast pístového toku (obr. 6 – zóna A) a proudění v oblasti zkratové (zóna B).

Při skutečné výměně vod se v bazénu vytváří nehomogenní kvalitativní pole, poněvadž počet vtokových otvorů je vždy omezený. Kolem každého vtokového paprsku vzniká směšovací prostor s nehomogenním rozdělením kvality.

Pro skutečné směšování proto neplatí výraz  $C_0(\mathbf{t}) = C_n(\mathbf{t})$ , takže je třeba jej korigovat ve smyslu funkční charakteristiky nedokonalého směšování

$$C_0(t) = \varphi C_n(t)$$

Rovnice 7: Funkce charakteristiky nedokonalého směšování

kde  $\varphi$  je korekční faktor odtokové kvality. Aplikujeme-li tuto korekci na analytické vyjádření funkce  $C_n(\mathbf{t})$ , změní se rov. 6 na tvar

$$C'_n(t) = -\varphi \frac{C_n(t)}{T} + \frac{C_p}{T},$$

takže:

$$k_1 = -\frac{\varphi}{T} \quad ; \quad k_2 = \frac{C_p}{T} \quad \text{a}$$

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{C_p}{\varphi} \quad \text{a} \quad x = t \quad .$$

Hledaná funkce  $C_n(t)$  pro rov. 6 bude pak definována ve tvaru:

$$C_n(t) = \left(C_{t_0} - \frac{C_p}{\varphi}\right) e^{-\varphi \frac{t}{T}} + \frac{C_p}{\varphi}$$

Rovnice 8: Mezní vyjádření kvality vody při „reálné výměně“ vody

Relativní stupeň výměny vody při skutečném směšování podle obecná definiční rov. 2, při použití rov. 8, je určen vztahem:

$$\psi_s(t) = \frac{C_{t_0} - \left(C_{t_0} - \frac{C_p}{\varphi}\right) e^{-\varphi \frac{t}{T}} - \frac{C_p}{\varphi}}{C_{t_0} - C_p}$$

Rovnice 9: Funkce charakteristiky nedokonalého směšování

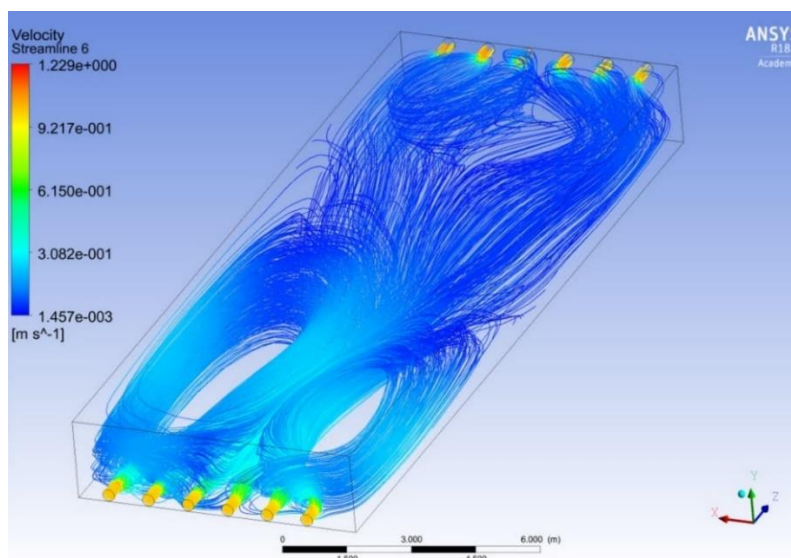
Rovnice představuje časový průběh skutečné výměny, tj. výměny nedokonalé s nedokonalým směšováním, která vzniká v bazénu se zcela konkrétním výměnným systémem, který lze charakterizovat určitým počtem vtokových otvorů a s určitým jejich umístěním v konstrukce bazénu.

Podle typu výměnného systému a intenzity recirkulace se může průběh výměny vyskytovat, podle obr. 6, buď v oblasti A nebo v oblasti B, o čemž rozhoduje hodnota faktoru  $\varphi$ .

Další výklad dle prací *Balneotechnika I* v kapitole „3.1.4.2 Hydraulický faktor nádrže“ věnuje analytickému vyjádření hydraulického faktoru nádrže  $\varphi$  a popisuje různé mechanismy stanovení tohoto faktoru v závislosti na dokonalosti či nedokonalosti výměny vody.

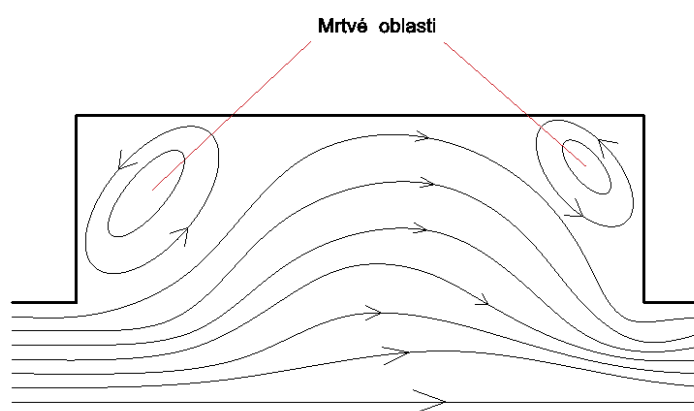
### 3.2.2. Vliv rozmístění míst vtoků a výtoků v bazénu

Jedním ze základních faktorů ovlivňujících kvalitu vody v bazénu je doba, za kterou jednotlivé částice vody urazí od místa vtoku do místa výtoku z bazénu. Dráhu, kterou jsou vedeny jednotlivé částice, lze pojmenovat vodní trajektorií (vodním paprskem). Na kvalitu vody v bazénu má vliv také tvar a směr vodních paprsků. Čím kratší je doba zdržení vodní částice v bazénu, tím kratší je cesta k výtoku, a tím pádem se dezinfekční činidlo nestihne rozprostřít, do co největšího vodního objemu bazénu. Naopak, když se upravená voda přitékající z filtrů zdrží v bazénu moc dlouho, dezinfekční činidlo ztrácí s časem svoji účinnost, a dochází v bazénu k nárůstu znečištění.



Obrázek 7: Ukázka vodních paprsků

Dokonce může nastat případ, kdy paprsky vody směřují přímočaře od místa vtoku do místa odtoku z bazénu. V tomto případě nedochází ke směšování přitékající upravené vody z vodou v bazénu, a nastává tzv. "zkratové proudění". Výsledkem je, že znečištěná voda v bazénu neodtéká a koluje uvnitř bazénu. Rozprostření dezinfekčního činidla rovnoměrně ve vodním objemu lze zajistit jen při využití difuze dezinfekčního činidla.

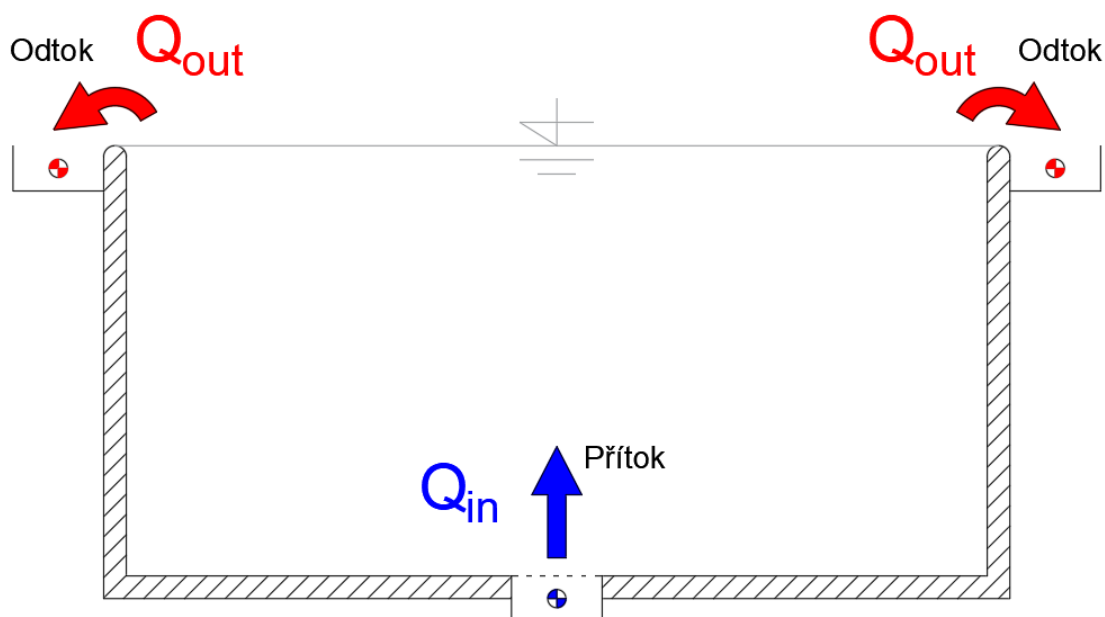


Obrázek 8: Ukázka mrtvých prostorů kolem toku

Primárně, na délku vodního paprsku, má vliv geometrie bazénu a taky tvar a rozmístění odběrné-vtokových míst. Ale každý z těchto prvků je omezen podmínkami bezpečnosti a zařazen do celého systému výměny a úpravy vody.

Pro účel této práce jsou místa odběru stanovena prototypem a zařazeny do geometrie modelu a taky do okrajových podmínek. Podrobnější popis geometrie a okrajových podmínek je uveden v kapitolách 4.1.4.1; 6.6 a 6.8.





Obrázek 9: Schéma umístění přítoků a odtoků v bazénu

Taky s ohledem na specifiku vybrané úlohy pro řešení a zkoumání problematiky směšování vody v bazénech podrobnější popis jednotlivých součástí čistících, sanitárních, filtračních a ohřívacích prvků systému výměny vody v bazénu není potřeba. Další výklad věnujeme konkrétním faktorům a fyzickým jevům ovlivňující bezprostředně proudění uvnitř bazénu.

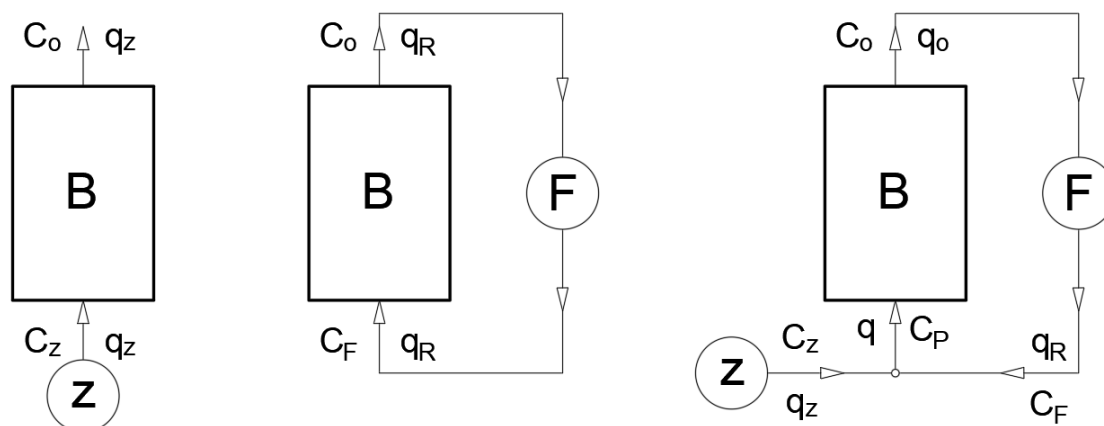
### 3.2.3. Intenzita recirkulace

„Pro stanovení intenzity recirkulace je třeba specifikovat funkci  $C_p(t)$  tj. přítokovou kvalitu a její vazbu na poměry chlorování v bilanční diferenciální rovnice:

$$C'_n(t) = T^{-1}[C_p(t) - C_o(t)] + Z_n \quad \text{Rovnice 10: bilanční diferenciální rovnice}$$

kde  $T$  – je teoretická doba zdržení.

Přítok do bazénu má určitou kvalitu, která je reprezentována podle obr. 10 buď kvalitou vodního zdroje,  $C_z$ , filtrátem  $C_f$ , nebo kvalitou  $C_p$  tj. směsí  $C_z$  a  $C_f$ .  $\rightarrow C_p = \frac{q_R C_p + q_z C_z}{q_R + q_z}$



Obrázek 10: Varianty přítokové kvality vody podle zdrojů

Kvalita vodního zdroje (v zákalu)  $C_z$ , je prakticky konstantní a je určena rozbořem vody.

Kvalita filtrátu závisí na mnoha faktorech, a proto tato problematika vyžaduje bližší rozbor.

Intenzitu recirkulace je taktéž možno stanovit i orientačně podle hloubek bazénu takto:

Tabulka 2: Závislost intenzity recirkulace vody na hloubce bazénové nádrží.

| $h_B$ [m]    |       | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,5 |
|--------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kryté bazény | T [h] | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 6,0 | 6,5 | 7,0 |
| Nekryté baz. |       | 2,0 | 3,5 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |

Intenzita recirkulace (T) se týká jmenovitého výkonu úpravní včetně všech rezerv čerpacích agregátů. Potřebné recirkulované množství vody v  $m^3/h$  je orientačně určeno podílem z objemu bazénu a teoretické doby zdržení vody. Upřesňuje se výpočtem, ve kterém je zahrnuta návštěvnost, typ bazénu a požadovaná jakost vody.

#### 3.2.4. Rozměry a tvar bazénu, vliv kapacity recirkulačních úpraven vody.

Úprava vody musí mít potřebnou kapacitu, vyplývající z objemu bazénu a intenzity recirkulace. Způsob stanovení intenzity recirkulace již byl zmíněn v předchozích kapitolách.

Objem bazénové nádrže bezprostředně závisí na rozměrech jednotlivých parametrů bazénu. Mluvíme-li o rovnoběžnostěnem bazénu jsou ty parametry: hloubka, šířka a délka. U složitých tvarů bazénové nádrží hrají roli další parametry, jaké jsou půdorysný tvar, proměnlivý sklon dna, zaoblené styky stěn se dnem a další.

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST, MĚŘENÍ ZÁJMOVÝCH RÝCHLOSTNÍCH BODŮ

### 4.1. Obecný popis bazénu-prototypu a použitých přístrojů

#### 4.1.1. Lokalita

Vybraný bazén pro měření a následné modelování a simulaci se nachází ve Středočeském kraji, obec Vestec, ve vlastnictví firmy „VAGNER pool“ (severní část areálu), která se specializuje na – bazénové technologie a příslušenství.



Obrázek 11: Sídlo firmy „VAGNER pool“



Obrázek 12: Bazén ve vlastnictví firmy a hlavní budova

#### 4.1.2. Technologické vybavení

Bazénová soustava je tvořena ze dvou částí – úpravna vody a bazénová nádrž.

##### 4.1.2.1. Bazénová nádrž

Vybraný bazén má složitý tvar s různými hloubkami a půlkruhovými schody. Celkově se takový tvar dá zjednodušit do lichoběžníkového tvaru. Podrobný popis geometrie je uveden v kapitole 4.1.4. Tělo bazénu je plastové. Obklad kolem bazénu je tvořen keramickou dlažbou.

Voda z úpravny se dodává do bazénu přes dvě trysky ve mělčí části dna bazénu, mají průměr cca 20 cm a jsou kryty jemnou mřížkou pro zamezení ucpání vtokových otvorů.

Pro účely rekreace se voda dodává přes chrlič bodový a chrlič štěrbinový. Dále je bazén vybaven hydromasážními systémy různých typů.



Obrázek 13: Ukázka vybavení bazénu

Z bazénu do úpravný se voda dopravuje přes přelivný žlab šířky 0.3 metry na kratší stěně naproti schodů. Délka přelivného žlabu je totožná s délkou kratší stěny bazénu, a to je cca 4,0 metry. Žlab je chráněn proti vniku nežádoucích objektů pomoci plastového roštu.



Obrázek 14: Přelivný žlab chráněný plastovým roštem.

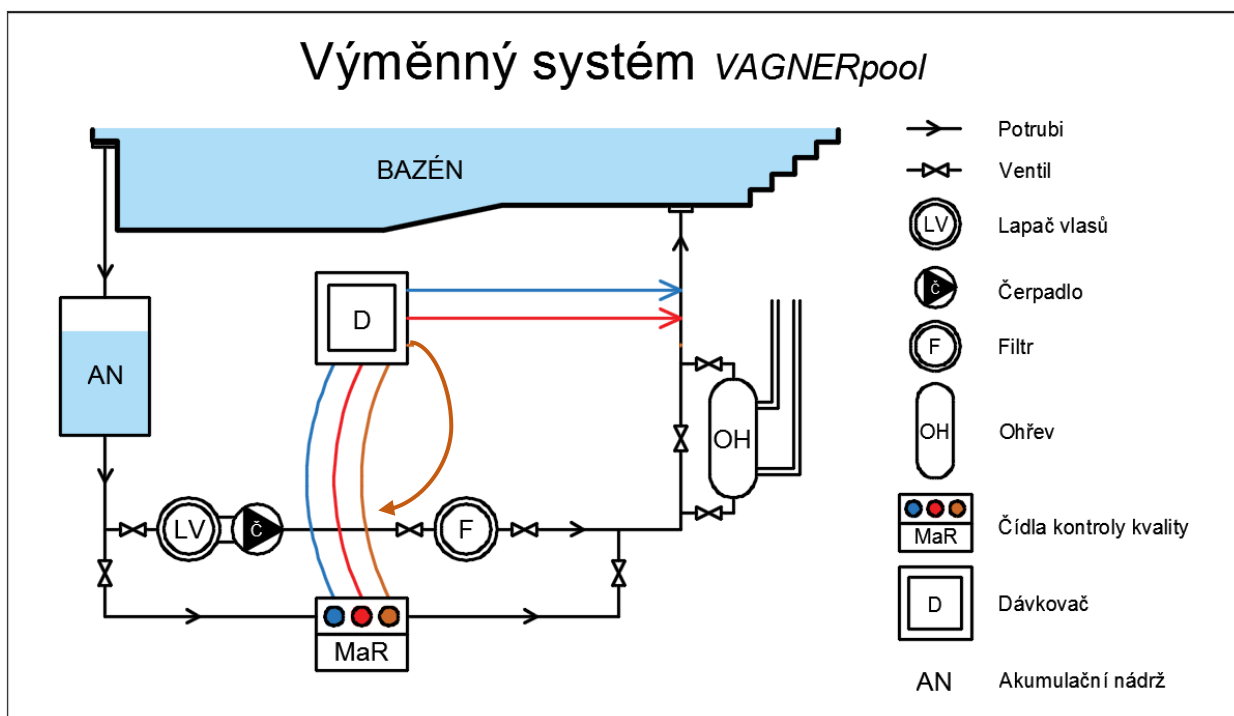
Po dobu mimo provozní může být bazén překryt gumovou plachtou pomocí pevného navíjecího zařízení.



Obrázek 15: Přelivný žlab a stočená krycí plachta.

#### 4.1.2.2. Úprava vody

Z bazénové nádrže se voda dostává do úpravně vody, která je tvořena několika zařízeními. Každé z těchto zařízení přispívá k recirkulaci, odstranění znečištění z vody, dodání její kvality a požadované teploty.

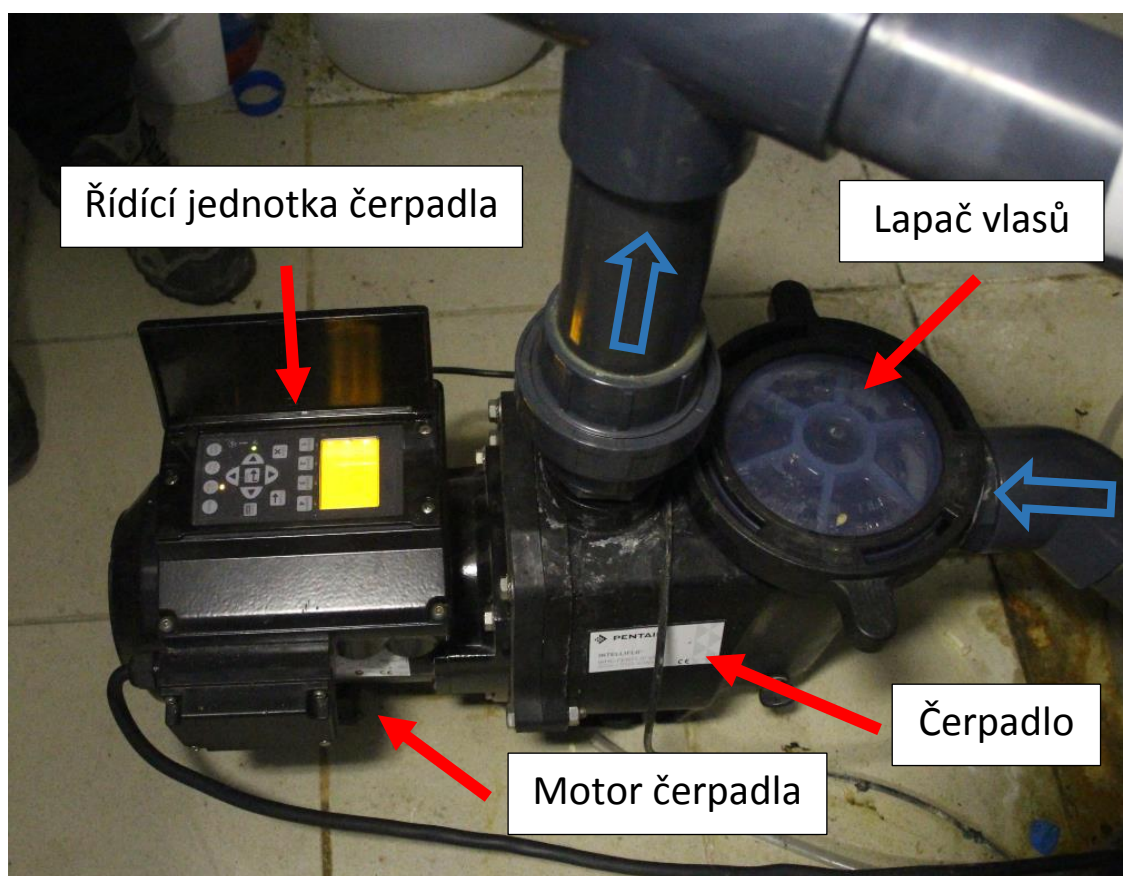


Obrázek 16: Orientační schéma výměnného systému.



Obrázek 17: Úprava vody.

- *Potrubní systém* – Potrubní systém spojuje jednotlivé součásti výměnného systému a poskytuje dopravu bazénové vody mezi nimi. Průměr potrubí kolísá od 32 mm až 200 mm. Materiál je PVC. Pro změnu směru potrubního vedení slouží tvarovky různých tvarů a rozměrů. (viz. Obr. 17)
- *Ventily* – ventily jsou určeny pro omezení nebo úplné zamezení průtoku v potrubním systému. Jsou hlavními nástroji manipulace s průtokem a některé z nich jsou napojené na hlavní řídicí jednotku která ovládá tyto ventily. Ostatní jsou manipulovány ručně. (viz. Obr. 17)
- *Akumulační nádrž* – před tím než se voda dostane do úpravně se akumulují ve samostatné nádrži, která zajistí akumulaci vody přitékající z bazénu
- *Lapač vlasů* – prvním krokem na cestě vody v úpravně je lapač vlasů. Zařízení zachycuje a odstraňuje část hrubých nečistot z proudu, což jsou vlasy, mělké stonky rostlin, listy rostlin atd. (viz. Obr. 18)
- *Odstředivé čerpadlo* – čerpadlo je „srdcem“ výměnného systému. Umožňuje koloběh vody, kontroluje průtok a, tím pádem, i rychlost proudu a výměny vody v bazénu. Muže byt napojeno na hlavní řídicí jednotku pro komplexní manipulaci se systémem. (viz. Obr. 18)



Obrázek 18: Lapač vlasů a odstředivé čerpadlo.

- *Pískový filtr* – Po odstranění hrubých nečistot lapačem vlasu z vody je nutno provést jemnější filtraci. Tento proces běží v speciální nádobě filtru, který je naplněn médiem na bázi písku. Frakce písku se stanoví technologem v závislosti na druhu použití, a míře zatížení bazénu. Průměr filtrační nádoby je v našem případě cca 750 mm. Velikost ovladatelného průtoku se pohybuje kolem 20 až 22 m<sup>3</sup>/h. Nádoba je vyrobena ze sklolaminátu. (viz. Obr. 19) (Filtrační nádoba TRITON – TR 100)



Obrázek 19: Pískový filtr.

- *Ohřev* – teplota vody se reguluje pomocí tepelného výměníku napojeného na vedlejší větev potrubního systému bazénu. Tepelný výměník vyrovnává teplotu bazénové vody. (viz. Obr. 20)



Obrázek 20: Tepelný výměník.



- *Hygienická kontrola* – hygienická kontrola se uskutečňuje pomocí čidel pH, chloru a ORP, dávkovací stanice a řídicí jednotky. Čidla vyhodnotí vzorek vody a měří příslušnou hodnotu pH, obsahu chloru, redox potenciálu nebo koagulantu (viz. Obr. 21). Pak řídicí jednotka dopočítává potřebnou dávku v závislosti na nastavení. Tuto dávku dodává do proudu dávkovací stanice pomocí peristaltických čerpadel. (viz. Obr. 22)



Obrázek 21: Dávkovací čidla a řídicí jednotka.



Obrázek 22: Peristaltické pumpičky.

Na konci úpravy se voda pohybuje směrem zpátky do bazénu přes vtokové trysky. Trysky jsou vyrobeny a umístěny tak, aby proud byl schopen zasáhnout co největšího bazénového prostoru.

### 4.1.3. Použité přístroje pro měření

#### 4.1.3.1. Geometrie

Před zahájením měření rychlostních bodů je potřeba zaměřit standartní parametry bazénu, což jsou:

- *Půdorys* – jelikož vybraný bazén má obyčejný obdélníkový půdorys, s výjimkou půlkruhových schodů, hlavními parametry pro měření jsou **délka** a **šířka**.
- *Bokorys* – bazén v podélném profilu má protáhlý lichoběžníkový tvar. Tady je třeba zaměřit dvě **hloubky** a **délky**. Délku sklonu lze dopočítat pomocí celkové délky.
- *Schody* – u půlkruhových schodů je třeba znát poloměr vnějšího okruhu a výšku stupňů.
- *Nárys* má obdélníkový tvar a jeho rozměry vyplývají ze dvou hloubek změřených v bokorysu a šířky bazénu změřené v půdorysu

Každý z uvedených parametrů, vyjma hloubek a výšek, byl změřen pomocí laserového dálkoměru. Hloubky a výšky byly změřeny pomocí nivelační lať.

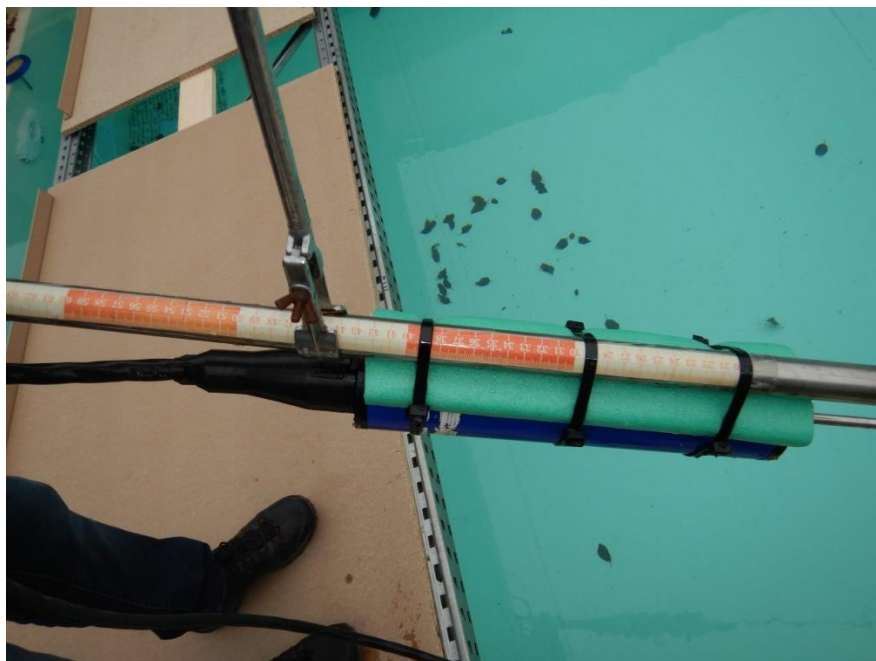
- *Laserový dálkoměr* – pro účely zaměření vodorovných parametrů bazénu byl použit laserový dálkoměr firmy OPTEX, model LX-40. Model má rozsah měření od 0,05 až 40 metrů. Přesnost měření kolísá od 1,0 až 1,5 mm. Také má možnost výpočtu plochy a nepřímého výpočtu výšky, což během uvedeného měření nebylo použito. Všechny výsledky měření a další informace, což jsou stav baterie, výsledky předchozího měření atd., se zobrazují na LED displeji.



Obrázek 23: Laserový dálkoměr OPTEX LX-40

- *Nivelační lať* – pro účely zaměření svislých parametrů bazénu byla použita improvizovaná nivelační lať. Na ocelovou tyč o průměru cca 2 cm a délky

přibližně 2,5 metrů byl nalepen pomocí lepících pásek část svinovacího metru délkou 2 m (viz. Obr. 24 – soustava nivelační latí a ADV sondy)



Obrázek 24: Soustava nivelační latí a ADV sondy

- Svinovací metr – Pomocí svinovacího metru byly dále označeny rychlostní profily A, E, B, C a D podél delší strany bazénu a následně podél kratší strany bazénu profily 1 až 5. V posledním případě označení provedeno na deskách na přehradové konstrukci, o které bude podrobně řečeno v následujícím oddílu.

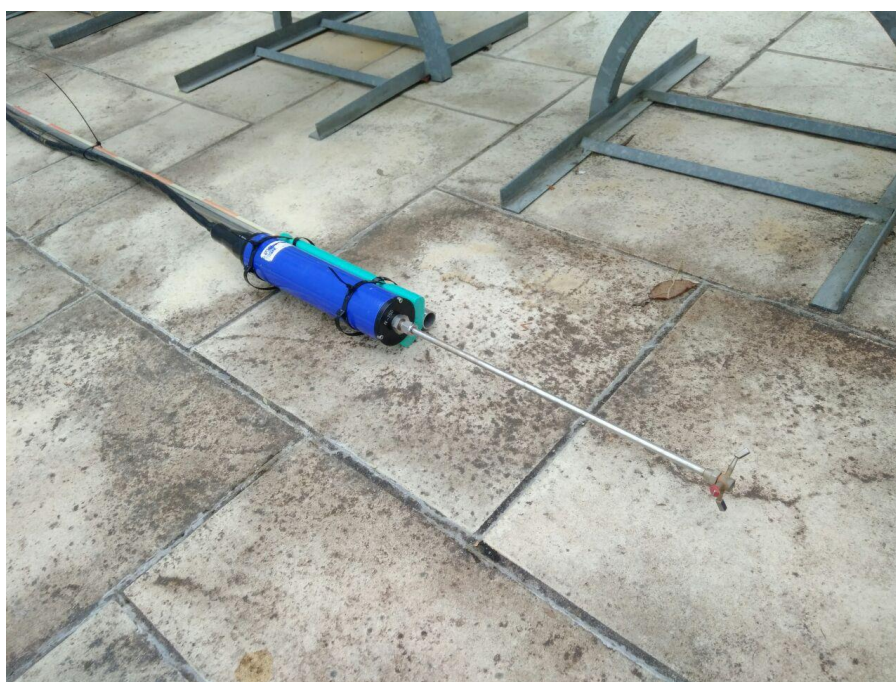


Obrázek 25: Svinovací metr

#### 4.1.3.2. Rychlostní profily

Pro umožnění měření rychlostí v jednotlivých bodech je nutno připravit následující přístroje a konstrukci:

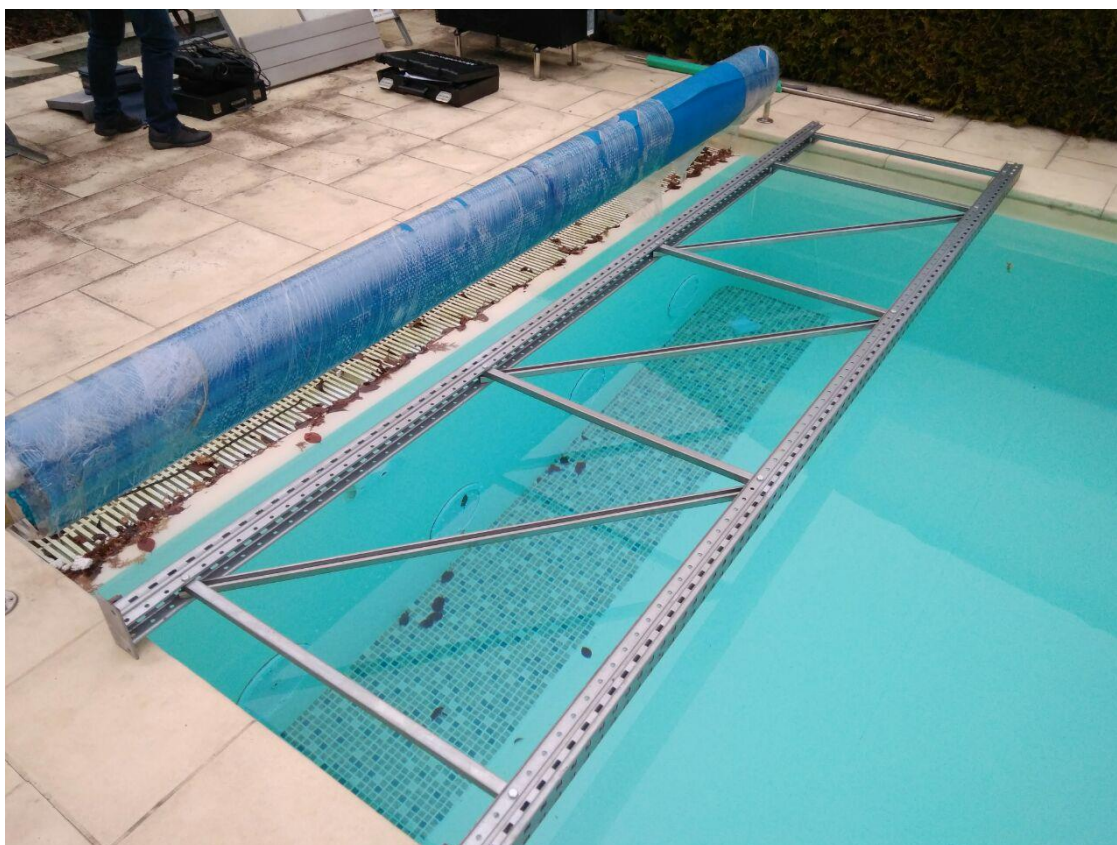
- ADV sonda – Pro měření rychlostí v zájmových bodech byl použit přístroj, jehož princip měření rychlosti proudu je založen na Dopplerovém jevu – ADV (Acoustic Doppler velocimeter) viz. obr. 26. Hlavní řídicí jednotka přístroje se nachází v modrém válci. K válci je připojena tyč s čidly na konci, které vysílají a přijímají signál v určitém bodě o vzdálenosti cca 5 cm pod čidly, a taky kabel, kterým se přístroj spojuje s počítačem pro zpracování naměřených dat.



Obrázek 26: ADV-přístroj „SonTek“.

Pro umožnění měření rychlostí v určitých hloubkách, byl přístroj namontován na nivelační lať tak, aby úroveň bodu měření odpovídala plánu. Pro snadnou manipulaci během přesunu hloubek měření byly udělány rysky na lati.

- Přehradová konstrukce přemostění – Při měření rychlosti proudu je nutno pomatovat, že jakýkoliv zásah do bazénu značně ovlivní výsledky měření. Tento fakt velice komplikuje manipulaci s ADV-přístrojem. Aby bylo umožněno měření zájmových bodů a zároveň nebylo ovlivněno proudění přítomností člověka v bazénu, byla pořízena přehradová konstrukce a překryta dřevěnými lamely. Tento „mostek“ byl umístěn napříč bazénu kolmo na delší stěny, viz. obr. 27 a 28.



Obrázek 27: Pomocná přehradová konstrukce



Obrázek 28: Pomocná přehradová konstrukce s OSB desky

- Správní stanice – Pro snadný záznam výsledků měření a operativní řízení postupu měření byla vytvořena improvizovaná „správní stanice“ v blízkosti schodů bazénu. Stanice byla vybavená počítačem napojeným na ADV sondu pro záznam výsledků měření. Dále se ve stanici nacházely plány měření, elektrické vybavení a ostatní nezbytné pomůcky.



Obrázek 29: Správní stanice

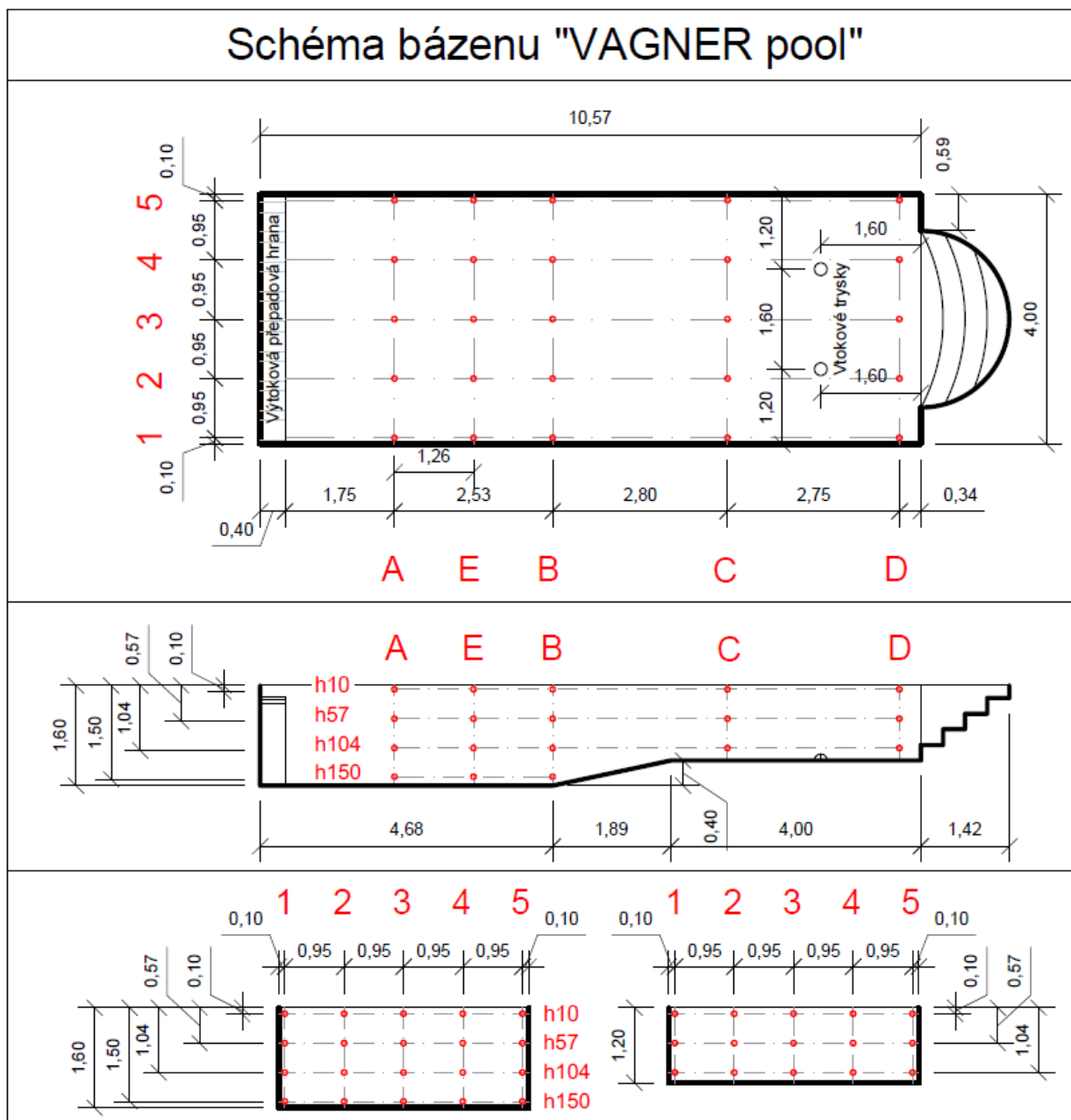


Obrázek 30: Počítač napojený na ADV sondu

#### 4.1.4. Postup a výsledky měření

##### 4.1.4.1. Geometrie

Po provedení všech potřebných geometrických měření bylo vytvořeno schéma bazénové nádrže a následně označeny zájmové body měření:



Obrázek 31: Schéma bazénu a body měření

#### 4.1.4.2. Zájmové body

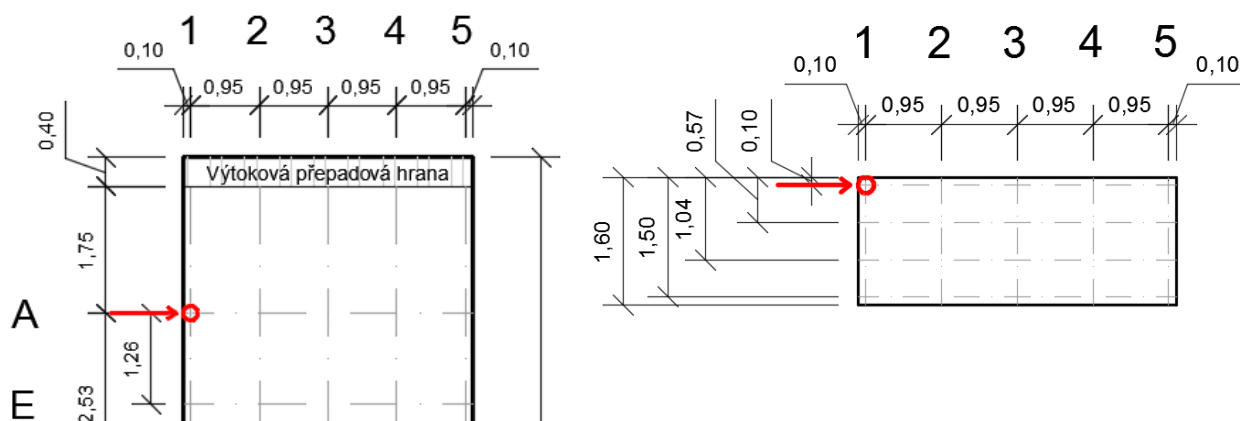
Jak je vidět na obrázku 31 (Schéma bazénu), zájmové body jsou rozmístěny do pěti podélných profilů (1, 2, 3, 4, 5), pěti příčných profilů (A, E, B, C, D) a čtyřech hloubkových profilů (h10, h57, h104, h150). Celkem se výsledné rychlostní pole sestává ze sta bodů. Sledované rychlosti přístroj umožňuje zaznamenat ve třech směrech – podél os X, Y a Z, přičemž kladný směr osy X je orientován směrem ke schodišti, kladný směr osy Y je orientován směrem od hlavní budovy a osa Z je orientovaná vzhůru k hladině.

ADV-přístroj zaznamenává okamžitou rychlost proudu každých 0.04 vteřin po dobu 30 sekund. Z toho vyplývá že operátor přístroje musí při měření držet soustavu bez pohybu během půl minuty. Jakékoliv výkyvy nebo pohyby operátoru vyvolává i pohyby čidel ponořených ve vodě, což ve finále způsobí naměření nedůvěryhodných dat. Tyto data je třeba vyloučit ze záznamu provedením mediánového rozboru. Podrobnější popis této operace je popsán v kapitole 5.1

Manipulace se měrnou soustavou při přesunu z jednoho měrného bodu do druhého musí být uskutečněna opatrně, aby nebyl narušen „přirozený“ proud v bazénu.

První bod měření byl vybrán blízko levého horního rohu přelivné hrany – A1h10 (viz.obr.32), po změření tohoto bodu a odsouhlasení provedených měření se správní stanicí, měření pokračuje do bodu A1h57, soustava latě a přístroje se ponoří do hloubky 57 cm, což odpovídá předem udělané rysce na latí. Proces se opakuje směrem do hloubky až po bod A1h150, pak pro šetření času a pohybu ve vodě se soustava přemísťuje do bodu A2h150 ve stejné hloubkové úrovni. Měření pokračuje směrem vzhůru až na bod A2h10 a celý proces se opakuje pro plný profil A. Po změření posledního bodu v tomto profilu (A5h150) se soustava přemísťuje do bodu B5h10, a pak měření pokračuje v opačném směru k bodu B1h150.

Profil E byl zaměřen jako doplňkový. Účelem bylo zahustit bodovou síť u místa výtoku pro více reprezentativní výsledky.



Obrázek 32: Poloha bodu A1h10

Během měření zájmových bodů byly taktéž změřeny polohy dnových vpustí.

Veškerá data se automaticky ukládají na počítači do správní stanice pro následující zpracovávání.



## 5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.2.2, ADV-přístroj měří spoustu rychlostí po dobu 30 sekund s intervalem 0.04 sekundy. To tvoří celkem 750 hodnot **okamžitých rychlostí**. To znamená, že nejde o nějakou pevnou hodnotu, která by odpovídala charakteru proudění v příslušném zájmovém bodě. Tato řada dat reprezentuje celou texturu proudu v ekvivalentu rychlosti za určitý čas. S velkou pravděpodobností v jakýkoliv jiný časový okamžik, ale ve stejném bodě dostaneme odlišnou řadu dat, která může být shodná ve tvaru a extrémech, ale nikdy nebude opakovat předchozí výsledky.

| Processed by: WinADV32 - Version 2.024     |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
|--------------------------------------------|----------|------|------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|
| Filename = A1H10                           |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| Filtering = Unfiltered                     |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| Traversal Options =                        |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| Sampling Options = All samples             |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| Scaling Options = Raw data Probe (X, Y, Z) |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| WinADV Units = cm/s,cm                     |          |      |      |          |          |          |        |        |        |         |         |         |        |        |          |          |          |        |
| Time, sec                                  | Position | Flag | Vx_0 | Vy_0     | Vz_0     | COR0_0   | COR1_0 | COR2_0 | SNR0_0 | SNR1_0  | SNR2_0  | AMP0_0  | AMP1_0 | AMP2_0 | CORAvg_C | SNRAvg_0 | AmpAvg_C |        |
| 0.020                                      |          |      | 0    | 1.00     | -1.1900  | -0.6400  | 95     | 89     | 98     | 9.      | 6.IV    | 19.VIII | 74     | 70     | 98       | 94.      | 11.VIII  | 80.67  |
| 0.060                                      |          |      | 0    | -42.5600 | -1.3000  | -6.5100  | 30     | 93     | 99     | 17.II   | 12.     | 24.I    | 93     | 83     | 108      | 74.      | 17.VIII  | 94.67  |
| 0.100                                      |          |      | 0    | -7.2600  | 11.1800  | 1.00     | 94     | 26     | 99     | 17.II   | 12.V    | 22.VIII | 93     | 84     | 105      | 73.      | 17.V     | 94.    |
| 0.140                                      |          |      | 0    | -13.1800 | 31.9000  | 0.8700   | 39     | 18     | 19     | 17.VI   | 12.IX   | 21.I    | 94     | 85     | 101      | 25.III   | 17.II    | 93.33  |
| 0.180                                      |          |      | 0    | -13.5000 | -34.6800 | -10.4700 | 49     | 23     | 99     | 17.II   | 11.II   | 22.IV   | 93     | 81     | 104      | 57.      | 16.IX    | 92.67  |
| 0.220                                      |          |      | 0    | 1.00     | -0.9300  | -0.2400  | 92     | 90     | 97     | 16.III  | 12.     | 21.V    | 91     | 83     | 102      | 93.      | 16.VI    | 92.    |
| 0.260                                      |          |      | 0    | -3.8900  | 31.9000  | -0.1000  | 97     | 45     | 45     | 18.I    | 14.II   | 18.IX   | 95     | 88     | 96       | 62.3     | 17.I     | 93.    |
| 0.300                                      |          |      | 0    | -0.6800  | -0.3900  | -1.3600  | 96     | 95     | 98     | 22.IV   | 18.I    | 20.II   | 105    | 97     | 99       | 96.3     | 20.II    | 100.33 |
| 0.340                                      |          |      | 0    | -0.9000  | 0.5300   | -1.3000  | 95     | 95     | 96     | 21.V    | 17.VI   | 22.VIII | 103    | 96     | 105      | 95.3     | 20.VI    | 101.33 |
| 0.380                                      |          |      | 0    | -0.5300  | -1.0000  | -0.9800  | 98     | 93     | 98     | 20.VI   | 18.V    | 23.II   | 101    | 98     | 106      | 96.3     | 20.VIII  | 101.67 |
| 0.420                                      |          |      | 0    | -0.7200  | -1.5700  | -1.5100  | 98     | 97     | 97     | 16.III  | 15.IX   | 20.II   | 91     | 92     | 99       | 97.3     | 17.V     | 94.    |
| 0.460                                      |          |      | 0    | -0.9400  | 1.00     | -0.9100  | 97     | 92     | 97     | 16.VIII | 12.V    | 15.I    | 92     | 84     | 87       | 95.3     | 14.VIII  | 87.67  |
| 0.500                                      |          |      | 0    | -1.1600  | -0.2000  | -1.1600  | 92     | 95     | 93     | 18.IX   | 13.VIII | 16.III  | 97     | 87     | 90       | 93.3     | 16.III   | 91.33  |
| 0.540                                      |          |      | 0    | -1.8000  | -0.3600  | -1.4800  | 95     | 94     | 92     | 18.IX   | 18.IX   | 19.IV   | 97     | 99     | 97       | 93.7     | 19.I     | 97.67  |
| 0.580                                      |          |      | 0    | -1.1000  | -3.2000  | -0.9100  | 94     | 96     | 96     | 19.VIII | 21.I    | 19.IV   | 99     | 104    | 97       | 95.3     | 20.I     | 100.   |
| 0.620                                      |          |      | 0    | -1.5800  | -0.6200  | -0.8400  | 95     | 93     | 91     | 19.VIII | 22.IV   | 15.IX   | 99     | 107    | 89       | 93.      | 19.IV    | 98.33  |
| 0.660                                      |          |      | 0    | -1.5400  | -1.6800  | -1.4100  | 97     | 96     | 97     | 19.IV   | 23.VI   | 18.V    | 98     | 110    | 95       | 96.7     | 20.V     | 101.   |
| 0.700                                      |          |      | 0    | -1.3300  | -2.8900  | -0.9100  | 99     | 98     | 99     | 21.V    | 25.IV   | 23.II   | 103    | 114    | 106      | 98.7     | 23.IV    | 107.67 |
| 0.740                                      |          |      | 0    | -0.5600  | -1.8400  | -0.9700  | 97     | 98     | 99     | 20.VI   | 24.IX   | 22.VIII | 101    | 113    | 105      | 98.      | 22.VIII  | 106.33 |
| 0.780                                      |          |      | 0    | -1.2600  | 0.7200   | -1.1700  | 99     | 96     | 99     | 21.V    | 22.VIII | 25.IV   | 103    | 108    | 111      | 98.      | 23.II    | 107.33 |

Obrázek 33: Výsledky měření ADV-přístrojem v bodě A1h10

Jak je vidět na obrázku 33, ADV-přístroj poskytuje nejen informaci o velikosti rychlosti v tomto bodě, ale i spoustu jiných dat. Pro náš úkol jsou nejdůležitější řady Vx\_0, Vy\_0 a Vz\_0, což jsou rychlosti ve směrech X, Y a Z.

### 5.1. Úprava dat

Pokud chceme vytvořit model, který odpovídá realitě musíme umět tento model porovnat s výsledky reálného měření. Proto je třeba tyto výsledky upravit tak, aby hodnoty po úpravě byly jednoduše porovnatelné, ale pořád nezkrášlovaly celý charakter proudu.

Pro zpracování dat použijeme matematickou statistiku – Medián a Modus.

*Medián* hledá střední hodnotu v souboru dat s ohledem na počet dat v tomto souboru bez vnímání velikosti dat menších nebo větších než nalezený střed. To znamená, že ve řadě [75, 4, 2, 3, 2, 5, 1] medián bude číslo 3, protože v řadě, která se skládá ze 7-mi čísel, přičemž tři čísla jsou menší než číslo 3 a tři čísla jsou větší než číslo 3.

Pomocí Mediánu lze vyloučit z řady naměřených rychlostí záznamy, který byly způsobeny náhodnými pohyby s přístrojem a ostatní méně spolehlivá data.

*Modus* představuje hodnotu, která se v daném souboru vyskytuje nejčastěji. Pomocí Modusu lze najít v řadě s různých rychlostí „dominantní“ – to znamená takovou rychlost, která během 30 sekund měření nejlépe odpovídá celkovému charakteru proudění v tomto místě. Pro již zmíněný soubor [75, 4, 2, 3, 2, 5, 1] je Modus hodnota 2.

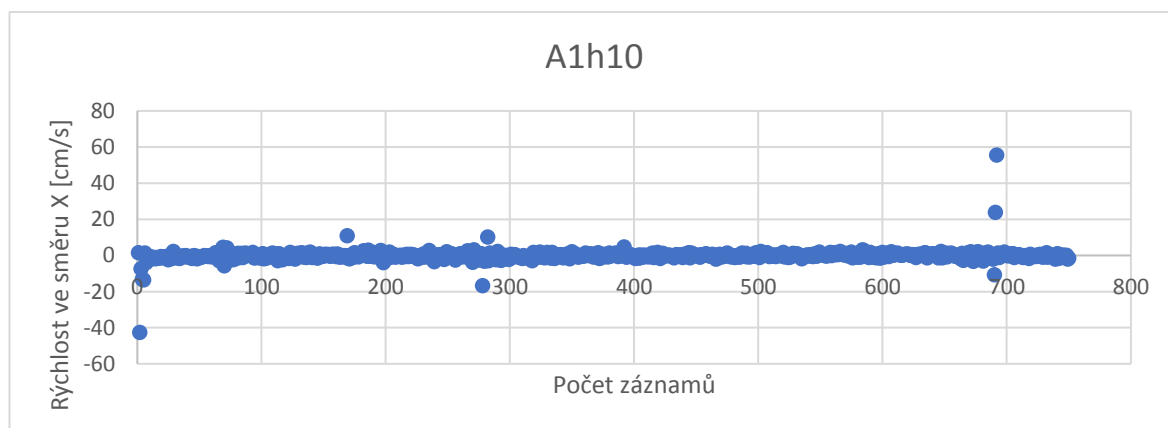
Při vylučování dat z řady musíme brát v úvahu i to, že i když nějaký záznam rychlosti není Modem, pořadí popisuje tvar proudu a tím ovlivňuje finální výsledek zjednodušení.

Kombinací těchto operátorů zpracujeme metodu opravy rychlostních řad do dvou hodnot:

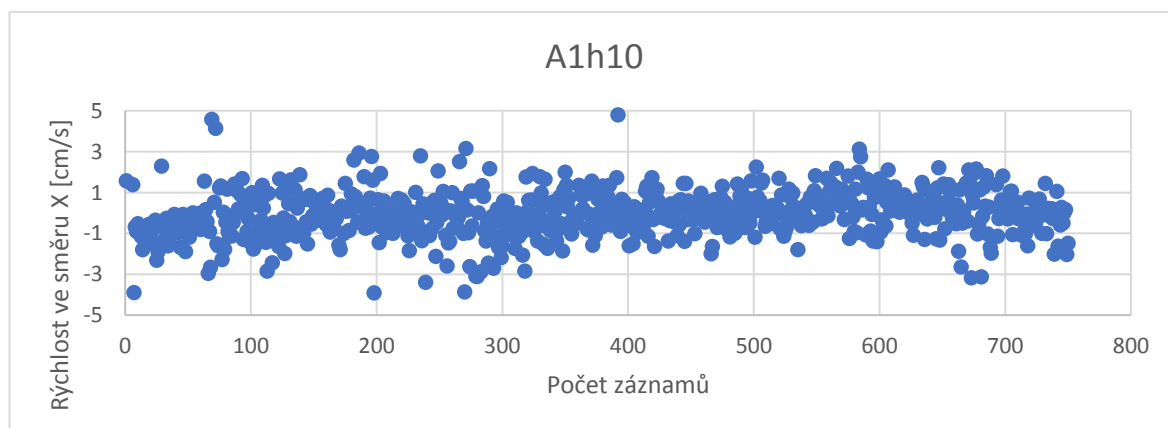
1. **Modus** – nejčastější vyskytující se hodnota ve řadě.
2. **M.modus** – průměrná hodnota kolem modu v rozmezí 10% odchylky.

Pokusíme se upravit řadu A1h10. Surová data vypadají takto:

Graf 1: Rychlostní profil A1h10



Graf 2: Rychlostní profil A1h10 (zvětšený)



Už z těchto dvou grafů je vidět, že některé extrémní hodnoty se vyskytují osaměle a mohou být vyloučeny pro další výpočet.

Použitím matematické funkce MODE prostřednictvím MS Office Excel najdeme **Modus** řady -0.08 cm/s.

Aby se našel **M.modus** řady, je třeba zavést několik předpokladů. Řekneme, že maximální a minimální hodnota v řadě jsou 100% odchylky od modu. Tím pádem, hodnoty větší, než desetiprocentní podíl od extrému mají být vyloučeny ze řady.

Příklad:

| Vx<br>[cm/s] |                            | Vx<br>[cm/s] |                                                   | Vx<br>[cm/s] | Odchylka |
|--------------|----------------------------|--------------|---------------------------------------------------|--------------|----------|
| 1,57         | Zaokrouhlíme na celé čísla | 2            | Modus = -1 cm/s<br>Max = 2 cm/s<br>Min = -43 cm/s | 2            | 100%     |
| -42,56       |                            | -43          |                                                   | -43          | 100%     |
| -7,26        |                            | -7           |                                                   | -7           | 14%      |
| -13,18       |                            | -13          |                                                   | -13          | 28%      |
| -13,5        |                            | -14          |                                                   | -14          | 31%      |
| 1,38         |                            | 1            |                                                   | 1            | 66%      |
| -3,89        |                            | -4           |                                                   | -4           | 7%       |
| -0,68        |                            | -1           |                                                   | -1           | 0%       |
| -0,9         |                            | -1           |                                                   | -1           | 0%       |
| -0,53        |                            | -1           |                                                   | -1           | 0%       |
| -0,72        |                            | -1           |                                                   | -1           | 0%       |

V takovém případě **modus** bude zprůměrován z rychlosti -4 cm/s která má odchylku méně než 10%. **M.modus** = -1,6 cm/s, což je větší, než **modus** na 60%.

Prahová hodnota 10% je vzata jen ve zkušebních účelech a může se měnit při porovnání s CFD modelem.

Pro případ bodu A1h10 **modus** = -0,08 cm/s a **M.modus** = -0,07 cm/s, což je trochu vidět i na grafu 2.

Nutno chápat i to, že uvedený způsob ne poskytuje absolutně správnou představu o chování průtoku v daném bodě, avšak umožní si představit konkrétní číslo, které se dá porovnat s matematickým modelem.

Dál v kapitole bude uveden přehled všech modifikovaných hodnot každého zájmového bodu.

## Rychlost proudu ve směru osy X [cm/s]

|    | 10 cm |       | 57 cm |       | 104 cm |       | 150 cm |       |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| A1 | -0,08 | -0,07 | 0,39  | -0,12 | -1     | -0,76 | -0,56  | -0,28 |
| A2 | 0,14  | -0,33 | 0,13  | 0,598 | 0,11   | 0,084 | -0,78  | -0,14 |
| A3 | 0,34  | 0,562 | -0,53 | -0,1  | 1,14   | 0,633 | -0,17  | -0,54 |
| A4 | 0,58  | 0,564 | 0,32  | 0,388 | 0,77   | 0,467 | -0,17  | -0,14 |
| A5 | -1,03 | -0,69 | -1,28 | -1,38 | -2,99  | -2,72 | -1,8   | -0,89 |
| B1 | -1,64 | -1,23 | 0,11  | 0,083 | -0,87  | 0,385 | -0,29  | -0,93 |
| B2 | 0,26  | -0,21 | -0,72 | -0,25 | -0,75  | -0,74 | -0,1   | -1,3  |
| B3 | 0,18  | 0,412 | -1,01 | -0,81 | -1,44  | -1,05 | -4,61  | -2,88 |
| B4 | 1,22  | 0,798 | 0,8   | 0,901 | -0,82  | -1,51 | -0,53  | 0,362 |
| B5 | 0,32  | 0,629 | -0,26 | 1,095 | 1,8    | 1,49  | 1,52   | 2,564 |
| C1 | 0,84  | 0,761 | 2     | 1,303 | 5,98   | 3,298 |        |       |
| C2 | -0,1  | -0,29 | -0,14 | 0,262 | 1,29   | 1,511 |        |       |
| C3 | -1,68 | -1,48 | 0,81  | 0,443 | -1,93  | -0,76 |        |       |
| C4 | 0,08  | -0,26 | -0,8  | -0,29 | 1,09   | -0,37 |        |       |
| C5 | -2,53 | -2,37 | 0,27  | 0,049 | 0,78   | 0,632 |        |       |
| D1 | 0,27  | 0,481 | -0,07 | 0,398 | -2,12  | -2,7  |        |       |
| D2 | 0,26  | 0,288 | -0,58 | -0,15 | 0,68   | -0,35 |        |       |
| D3 | -1,2  | -0,29 | 0,11  | 0,684 | -0,05  | -0,52 |        |       |
| D4 | -1,26 | -1,18 | -0,78 | -0,46 | 162,6  | 142,7 |        |       |
| D5 | -4,11 | -4,49 | 0,88  | 0,489 | 2,56   | 2     |        |       |
| E1 | -0,59 | -0,17 | 0,3   | -0,24 | 0,88   | 0,803 | -0,36  | 0,325 |
| E2 | -0,65 | -0,44 | 0,23  | -0,19 | 0,43   | 0,301 | 0,97   | 0,129 |
| E3 | -0,98 | -0,5  | 0,55  | 0,155 | -0,71  | 0,272 | 0,78   | 1,489 |
| E4 | 0,1   | 0,277 | 0     | 0,246 | 0,43   | 0,608 | -0,77  | 0,278 |
| E5 | -0,85 | -0,76 | 0,08  | -0,22 | -0,56  | -0,01 | 1,39   | 0,624 |
| E6 |       |       |       |       |        |       | -111   | -100  |

## Rychlost proudu ve směru osy Y [cm/s]

|    | 10 cm |       | 57 cm |       | 104 cm |       | 150 cm |       |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| A1 | -0,05 | -0,35 | 0,05  | -0,17 | 0,71   | 0,357 | 0,16   | -0,22 |
| A2 | -0,9  | -1    | -0,24 | 0,08  | 0,98   | 0,879 | 0,72   | 0,022 |
| A3 | -1,04 | -0,58 | 0,13  | 0,348 | 0,08   | -0,48 | 1,52   | 1,36  |
| A4 | -0,07 | 0,004 | 1,16  | 0,98  | 0,97   | 0,051 | 0,88   | 0,746 |
| A5 | -0,2  | -0,29 | -0,2  | 0,292 | -1,48  | -0,76 | 0,66   | 0,462 |
| B1 | -0,43 | -0,24 | -0,17 | -0,22 | -0,04  | 0,368 | -0,05  | 0,582 |
| B2 | -1,22 | -1,1  | 0,14  | -0,14 | 0,48   | 0,424 | 0,84   | 0,67  |
| B3 | 0,48  | 0,553 | 0,43  | -0,02 | 1,96   | 1,937 | 0,32   | 0,129 |
| B4 | -2,5  | -2,92 | 1,35  | 1,045 | 2,32   | 1,573 | 0,07   | 0,113 |
| B5 | -0,52 | -0,15 | -1,6  | 0,167 | -2,48  | -2,54 | 1,97   | 0,028 |
| C1 | -0,16 | -0,45 | 0,21  | -0,32 | 0,56   | 0,17  |        |       |
| C2 | 0,3   | 0,488 | -1,39 | -1,04 | -0,26  | 0,11  |        |       |
| C3 | 0,16  | 0,027 | 0,52  | -0,23 | 3,52   | 1,25  |        |       |
| C4 | 0,55  | 0,372 | 0,69  | 1,292 | -0,24  | -0,99 |        |       |
| C5 | 0,26  | -0,16 | 0,14  | -0,03 | 0,77   | 0,55  |        |       |
| D1 | -0,9  | -0,98 | -0,2  | -0,04 | 1      | 0,229 |        |       |
| D2 | 0,02  | 0,235 | 0,39  | 0,468 | 1,57   | 0,918 |        |       |
| D3 | 0,45  | 1,033 | 1,1   | 1,387 | 1,97   | 1,618 |        |       |
| D4 | -0,53 | -1,95 | 2,28  | 1,245 | -70,7  | -61,4 |        |       |
| D5 | -0,3  | 1,178 | -0,49 | -0,67 | 12,7   | 11,68 |        |       |
| E1 | 0,52  | 0,333 | -0,16 | 0,606 | -0,21  | 0,42  | 0,74   | 0,751 |
| E2 | 0,36  | 0,575 | -0,26 | 0,313 | 0,04   | 0,474 | 0,59   | -0,28 |
| E3 | 0,71  | 0,453 | -1,13 | -1,02 | -1,19  | -1,18 | -1,36  | -0,57 |
| E4 | -1,3  | -0,96 | 0,3   | -0,56 | -0,93  | -0,46 | -0,34  | 0,081 |
| E5 | -0,29 | -0,36 | -0,26 | -0,2  | -0,21  | 0,074 | 2      | 0,281 |
| E6 |       |       |       |       |        |       | -65,6  | -58,2 |

## Rychlost proudu ve směru osy Z [cm/s]

|    | 10 cm |       | 57 cm |       | 104 cm |       | 150 cm |       |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| A1 | -0,91 | -0,99 | -1,04 | -0,84 | -1,3   | -1,14 | -0,21  | -0,33 |
| A2 | 0,27  | 0,1   | -0,46 | -0,37 | -0,26  | -0,26 | -0,24  | -0,28 |
| A3 | -0,02 | 0,237 | 0,48  | 0,487 | 0,58   | 0,443 | -0,11  | -0,09 |
| A4 | 0,49  | 0,456 | 0,3   | 0,053 | -0,29  | -0,36 | 0,11   | 0,067 |
| A5 | 0,11  | 0,067 | 1,26  | 1,517 | 1,3    | 1,413 | 0,1    | -0,03 |
| B1 | -0,9  | -0,57 | -1,14 | -1    | -1,52  | -1,75 | -0,32  | -0,35 |
| B2 | 0,01  | -0,19 | -0,74 | -0,74 | -0,81  | -0,79 | -0,75  | -0,6  |
| B3 | -0,17 | -0,18 | -0,84 | -0,84 | -0,32  | -0,3  | 0,75   | 0,479 |
| B4 | -0,52 | -0,36 | -1,77 | -1,64 | -2,53  | -2,38 | -1,8   | -1,87 |
| B5 | 1,77  | 1,828 | 3,59  | 3,256 | 1,73   | 1,943 | -0,5   | -1,15 |
| C1 | -0,61 | -0,58 | -0,59 | -0,3  | -0,33  | -0,57 |        |       |
| C2 | -0,27 | -0,05 | 0,13  | 0,034 | -0,33  | -0,41 |        |       |
| C3 | -0,56 | -0,63 | -0,16 | -0,28 | -0,24  | -0,32 |        |       |
| C4 | 0,3   | 0,144 | -0,14 | -0,23 | -0,34  | 0,035 |        |       |
| C5 | 0,23  | -0,31 | -1,46 | -1,45 | -0,04  | 0,027 |        |       |
| D1 | -0,37 | -0,56 | -0,91 | -1,09 | -1,48  | -1,2  |        |       |
| D2 | 0,13  | 0,153 | 0,14  | 0,044 | -0,34  | -0,18 |        |       |
| D3 | -0,11 | -0    | 0     | -0    | 0      | -0,12 |        |       |
| D4 | -1,36 | -1,22 | -2,5  | -2,75 | -14,7  | -12,9 |        |       |
| D5 | 2,35  | 3,295 | -1,55 | -0,86 | -1,12  | -0,36 |        |       |
| E1 | -0,33 | -0,29 | 0,07  | 0,197 | -0,26  | -0,26 | -0,39  | -0,35 |
| E2 | -0,36 | -0,33 | -0,45 | -0,52 | -0,64  | -0,67 | -0,53  | -0,34 |
| E3 | -0,75 | -0,72 | -0,91 | -1,02 | -0,93  | -0,76 | -0,24  | -0,39 |
| E4 | -0,32 | -0,29 | -0,78 | -0,85 | -0,71  | -0,81 | -0,3   | -0,43 |
| E5 | -0,39 | -0,45 | -1,17 | -1,03 | -0,71  | -0,7  | -0,53  | -0,41 |
| E6 |       |       |       |       |        |       | 35,44  | 31,44 |

## 5.2.Reprezentace dat

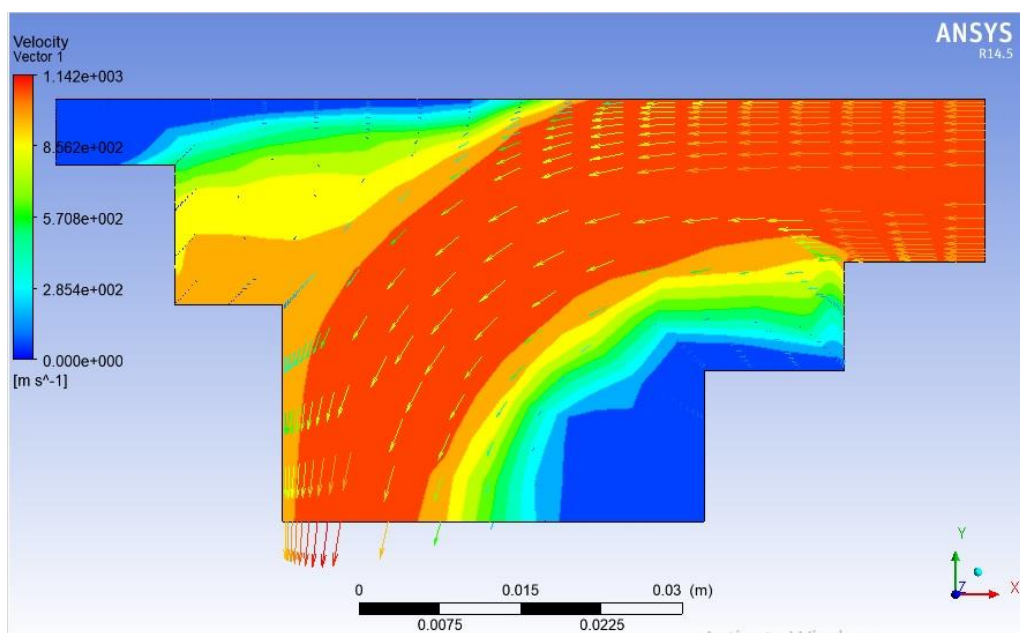
Opravená data je třeba zohlednit tak, aby bylo zřejmé vidět kam a jak rychle teče proud v bazénu. Pro tento účel bude vytvořeno pro každý profil vlastní rychlostní pole ve směru kolmém na příslušnou osu tzn., že pro profily A, E, B, C a D budou vytvořeny rychlostní pole s použitím jen rychlostí ve směru X, pro profily 1, 2, 3, 4 a 5 budou vytvořeny rychlostní pole s použitím jen rychlostí ve směru Y.

Tabulka 3: Rychlostní pole profilu A, složka X [cm/s].

|          |  | <b>X</b> |        |        |        |        |
|----------|--|----------|--------|--------|--------|--------|
| <b>A</b> |  | 1        | 2      | 3      | 4      | 5      |
| h10      |  | -0.065   | -0.331 | 0.562  | 0.564  | -0.687 |
| h57      |  | -0.120   | 0.598  | -0.097 | 0.388  | -1.379 |
| h104     |  | -0.761   | 0.084  | 0.633  | 0.467  | -2.719 |
| h150     |  | -0.279   | -0.135 | -0.541 | -0.145 | -0.890 |

Po vytvoření obdobným způsobem rychlostních profilů matematického modelu je možné porovnání s naměřenými rychlostmi a posouzení pravděpodobnosti modelu.

Způsob vypracování rychlostních profilů matematického modelu bude popsán v kapitole 6.10.



Obrázek 34: Ukázka rychlostního pole v prostředí ANSYS Fluent

## 6. CFD ANALÝZA

Pro vytvoření matematického modelu byl vybrán CFD program ANSYS Fluent. Další výklad je věnován obecným pojmům souvisejícím s pracovním prostředím programu, jeho fyzikálními možnostmi modelování a formou výstupu či výsledků výpočtu.

### 6.1. Pojem CFD

Výpočetní dynamika tekutin (angl. computational fluid dynamics) – je oblast mechaniky kontinua tekutin, využívající pro výpočet charakteristik proudění tekutin nejrůznější matematické a numerické techniky s využitím výkonných počítačů.

### 6.2. Základní principy CFD

Základním prvkem v oblasti výpočetní dynamiky tekutin je definice řídicích rovnic mechaniky kontinua (pohybové rovnice), mezi které patří pro izotermní proudění:

- a) Rovnice kontinuity/spojitosti;
- b) Rovnice zachování momentu hybnosti;

Rovnice zachování momentu hybnosti může mít různý tvar v závislosti na přítomnosti nebo absence tření. Navier-Stokesovy rovnice se používají pro případ reálných tekutin s třením, zatím co Eulerova rovnice tření neuvažuje. V závislosti na podmínkách zkoumaného prostředí můžeme kontinuum považovat jako stlačitelné nebo nestlačitelné. Ve druhém případě se rovnice značně zjednoduší.

Tyto rovnice popisují model pohybu kontinua. V závislosti na specifičnosti úlohy může být model doplněn rovnicemi popisujícími turbulence, přenos hmoty, chemickou reakci, fázové rozhraní, elektromagnetický vliv atd.

Pro zmíněné vlivy můžeme uvést vztahy, které tvoří soustavu nelineárních diferenciálních rovnic druhého řádu. Soustava má analytické řešení pouze v jednoduchých případech, když je Reynoldsovo číslo pro danou úlohu dost malé a geometrie není komplikovaná. V případě simulace reálného procesu se provádí tzv. *diskretizace* problému v prostoru a čase takovým způsobem, že oblast proudění se rozdělí do konečného počtu výpočetních buněk a pro nestacionární jevy se výpočet provádí v časových úrovních se zvoleným časovým krokem. Existuje několik různých způsobů řešení soustavy rovnic z hlediska jejich geometrické diskretizace například:

- a) Metoda konečných rozdílů;
- b) metoda konečných objemů;
- c) metoda konečných prvků.



### 6.3. Postup řešení

Pro popis postupu řešení jakékoliv úlohy v programu Ansys Fluent je potřeba zmínit jednotlivé výpočetní kroky:

1. Příprava vstupů (preprocessing) – zde se definuje geometrie pro daný problém včetně důležitých oblastí, diskretizace oblasti přípravou výpočetní sítě (mesh generation), definice důležitých fyzikálních parametrů a vlastností prostředí, volba počátečních a okrajových podmínek typických pro daný problém.

2. Výpočet – v této fázi program řeší diskretizovanou úlohu pomocí zvolené výpočetní metody za pomoci vhodných algoritmů. Výstupem jsou důležité veličiny a charakteristiky popisující prostředí daného kontinua (rychlost, tlak, hustota, teplota, entropie atd.), které jsou získány na základě zvolené prostorové diskretizace. V rámci náročnosti dané úlohy z hlediska potřeby výpočetního času lze uvažovat o využití technik paralelizace výpočtu, kdy se numerické řešení problému rozdělí na více výpočetních strojů (CPU), čímž se řešení může značně zrychlit.

3. Analýza výsledků (postprocessing) – výsledky řešení se zobrazí v podobě vhodných grafů, tabulek a dalších vhodných zobrazovacích technik pro vizualizaci proudového pole, např. v podobě kontur (vrstevnic), vektorů a trajektorií v závislosti na zvolené prostorové diskretizaci.

### 6.4. Stručný popis některých používaných metod

#### 6.4.1. Metoda konečných rozdílů

Metoda konečných rozdílů se vyznačuje snadným programováním. V současné době se používá jen v některých specializovaných výpočetních kódech, pracujících pro nepřiliš složité geometrie s velkou přesností.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0,$$

*Rovnice 11: Diferenciální tvar rovnice konečných rozdílů*

Kde  $\mathbf{Q}$  – vektor veličiny zachování,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$  a  $\mathbf{H}$  – toky veličin ve směru  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  a  $\mathbf{z}$ .

#### 6.4.2. Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů (angl. Finite Volume Method, FVM) je běžně používanou metodou zejména v oblasti výpočetní dynamiky tekutin. Má výhodu v nižších nárocích na výpočetní paměť a v rychlosti řešení. Další výklad pokračuje v kapitole 6.2.1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0,$$

*Rovnice 12: Rovnice konečných objemů*

Kde  $\mathbf{Q}$  – vektor zachovávaných veličin,  $\mathbf{F}$  – vektor toků veličin,  $\mathbf{V}$  – objem řídicího výpočetní buňky,  $\mathbf{A}$  – povrchová plocha výpočetní řídicí buňky.

#### 6.4.3. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků se používá při strukturální analýze tuhého kontinua, ale je též využitelná pro analýzu tekutin. Formulace metody však vyžaduje zvýšenou opatrnost pro zajištění konzervativního řešení. Přesto je metoda stabilnější, než metoda konečných objemů, ale vyžaduje větší operační paměti a delší výpočetní dobu než metoda konečných objemů.

$$R_i = \iiint W_i Q dV^e$$

Rovnice 13: Rovnice konečných prvků

Kde  $R_i$  – zbytková rovnice na vrcholu prvku  $i$ ,  $Q$  – rovnice zachování,  $W_i$  – váhový koeficient,  $V^e$  – objem elementu.

#### 6.5. Model turbulence

Jedním ze základních cílů numerického modelování chování turbulentního proudu je získání modelu, kterým je možno stanovit požadované veličiny, např. rychlosti tekutiny, za účelem inženýrského návrhu hydraulické konstrukce. Vliv různých zúčastněných charakteristických měřítek turbulence a složitost turbulentního jevu jako celku způsobuje, že jejich kompletní výpočet je neúnosně náročný a prakticky tedy nemožný. V takových případech prvotní přístup spočívá v návrhu numerických modelů, které dávají určité přiblížení plně neřešitelného turbulentního proudění. V této práci byl pro řešení turbulence použit přibližný model *Boussinequovy hypotézy*.

Podle této hypotézy jsou Reynoldsova napětí úměrná středním gradientům rychlosti obdobně, jako u vazkých napětí (Newtonův zákon). Konstantou úměrnosti je turbulentní viskozita  $\mu_t$ .

$$\tau_t = -\overline{\rho u'v'} = \mu_t \frac{\partial u}{\partial y}$$

Rovnice 14: Rovnice turbulentní viskozity

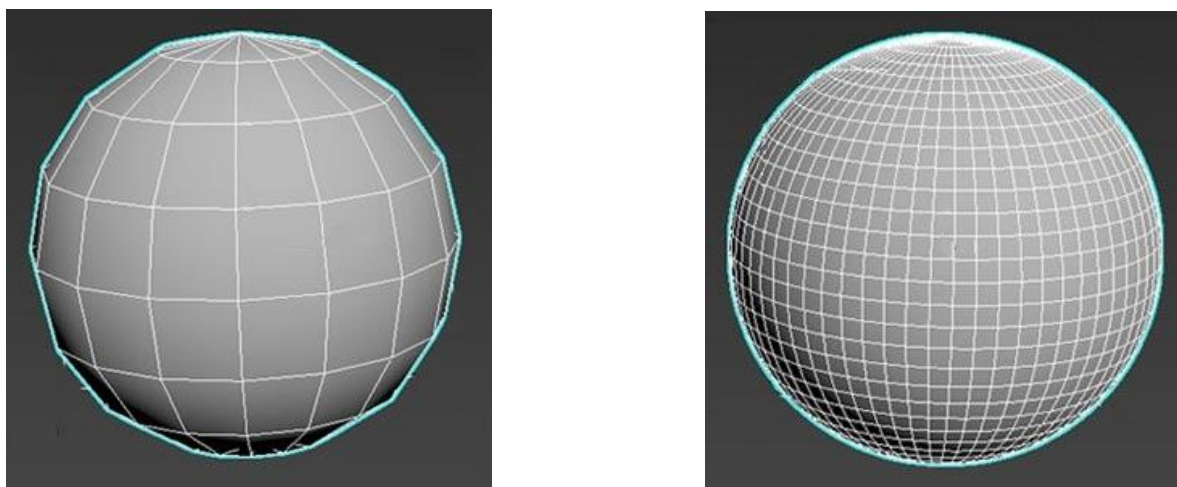
Pro popis turbulentního proudění je použit dvourovnicový model turbulence  $k-\epsilon$ .

Tento model patří k nejznámějším a v inženýrské praxi nejvyužívanějším modelům určeným k modelování turbulentního proudění. Mezi jeho výhody při modelování přenosu hybnosti a tepla patří ekonomičnost výpočtu a dostatečná přesnost pro široký rozsah typů turbulentního proudění. Hlavním předpokladem řešení daného modelu je plně vyvinuté turbulentní proudění a zanedbatelnost molekulární viskozity. Je vhodný na případy volného smykového proudění s malými gradienty tlaku.

## 6.6. Příprava geometrii k modelování

### 6.6.1. Tvorba modelu






Před samotným zahájením procesu výpočtu musíme připravit geometrický model prototypu bazénu. Nutno brát v úvahu, že při vytvoření jakéhokoliv matematického modelu, zejména pomocí počítačového programu, zdroje pro „kopírování“ objektů jsou omezené. Čím přesnější budeme snažit vybudovat tvary bazénu, vtokových míst apod., tím větší výpočetní výkon potřebujeme. Avšak nedosáhneme absolutní shody s reálným objektem. To se týká i různých typů grafických výstupu z modelů – rychlostní pole, vodní paprsky atd. Čili, pořád budeme mít „zjednodušený“ model reálného prototypu, a to ze strany jak geometrické, tak i fyzikální.



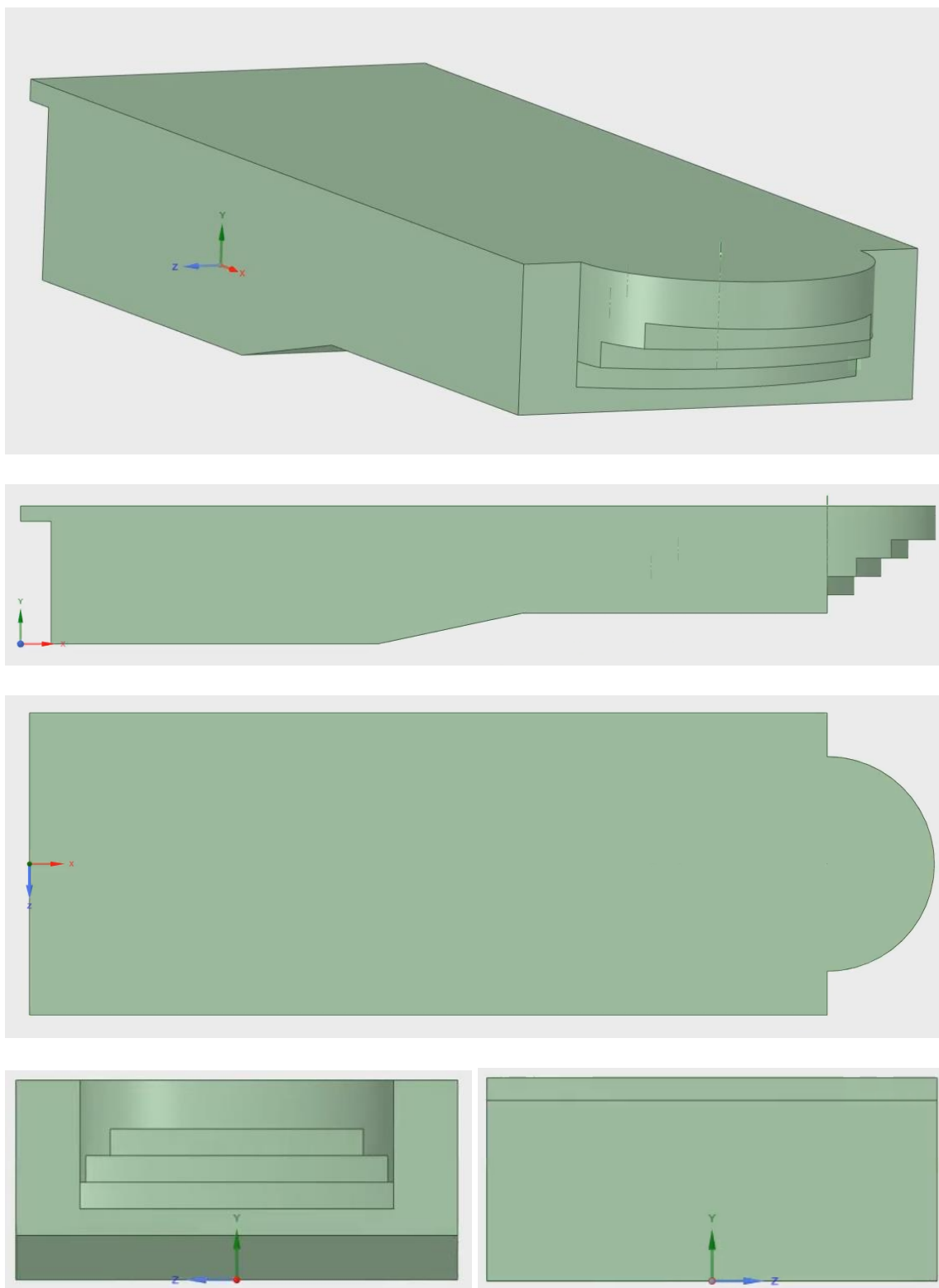
Obrázek 35: Závislost přesnosti geometrii modelu na počtu polygonů

Tyto zjednodušení musíme přesně vyznačit a najít „zlatý střed“ mezi variantou natolik nepřesnou, že nebude mít využitelné výsledky a variantou natolik složitou, že na vytvoření a výpočet modelu nebudou stačit zdroje.

Pro tvorbu geometrického modelu bude použit podprogram *SpaceClaim* a následující řada nástrojů tohoto programu:

- Čára  – Kreslí čáru na vybrané ploše.
- Pravoúhelník  – Kreslí pravoúhelník na vybrané ploše.
- Kružnice  – Kreslí kružnice na vybrané ploše.
- Odříznout  – Používá jeden čárový objekt jako hranici pro oříznutí druhého čárového objektu.
- Vytáhnou  – Přetváří čárový objekt do plochy a následně do prostorového objektu.

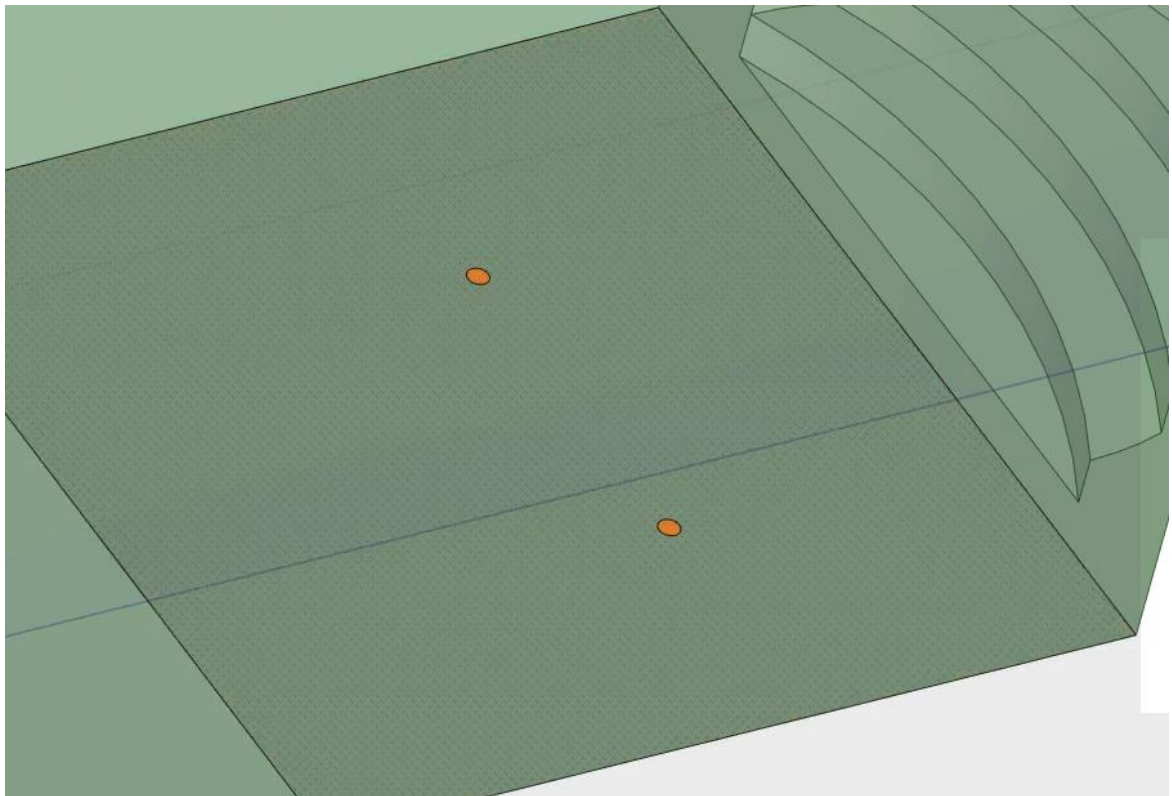
Při použití uvedených nástrojů a výkresu „Schéma bazénu VAGNERpool“ (viz. Obr. 31) z kapitoly 4.1.4.1. byla vytvořena geometrie bazénu:



Obrázek 36: Geometrie modelu bazénu VAGNERpool

Jak je vidět na obrázku 36, geometrie modelu bazénu je výš než prototyp. To bylo uděláno za účelem modelování rozhraní kapalně fázi (voda) a plynné fázi (vzduch) a umožnění modelování povrchových vln. Tloušťka vzdušné vrstvy je uvažována 20 cm.

Místa vtoků (vpustí) jsou označeny v geometrii modelu jako kružnicové plochy o průměru 10 cm každé. Toto zjednodušení odpovídá redukované výpustní ploše reálného prototypu v důsledku překrytí trysek ocelovou mřížkou.



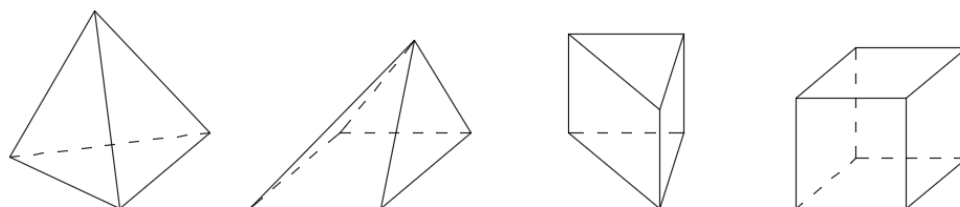
Obrázek 37: Místa vtoků do bazénu (jsou označený oranžově)

### 6.6.2. Výpočetní síť

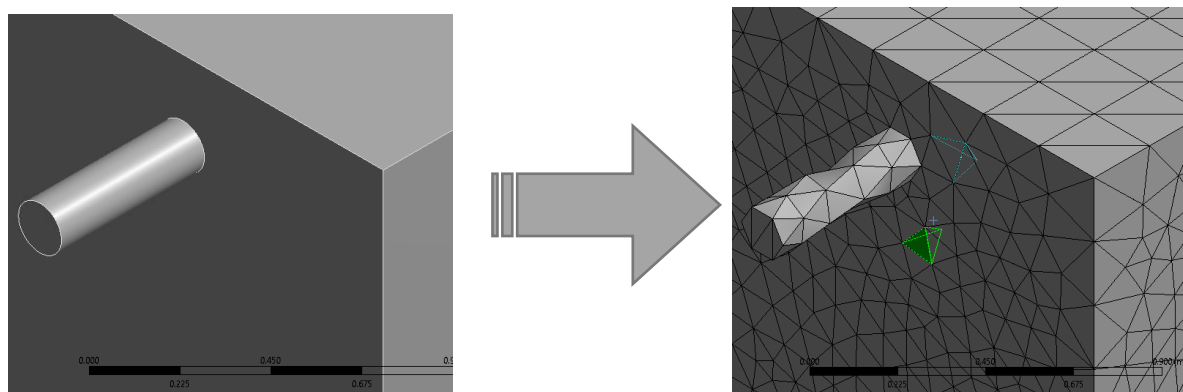
Aby výpočetní program dokázal správně interpretovat vytvořenou geometrii jako fyzicky omezený prostor, musíme připravit výpočetní síť, kterou tvoří soustava buněk. Pro řešení v této síti můžeme využít metodu konečných objemů (aplikovaná v ANSYS Fluent).

Metoda konečných objemů je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném matematickém modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu objemových prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v uzlových bodech každé z těchto buněk a vytvářejí tak tzv. *výpočetní síť*.

Buňky výpočetní sítě se mohou kombinovat tak, aby bylo dosaženo optimální sítě. Proto ve speciálním editoru v prostředí ANSYS FLUENT (mesh generator) jsou nástroje na úpravu tvaru, počtu a rozměrů jak jednotlivých buněk, tak i celé sítě. Zde jsou uvedeny některé nabízené tvary výpočetních objemových buněk:

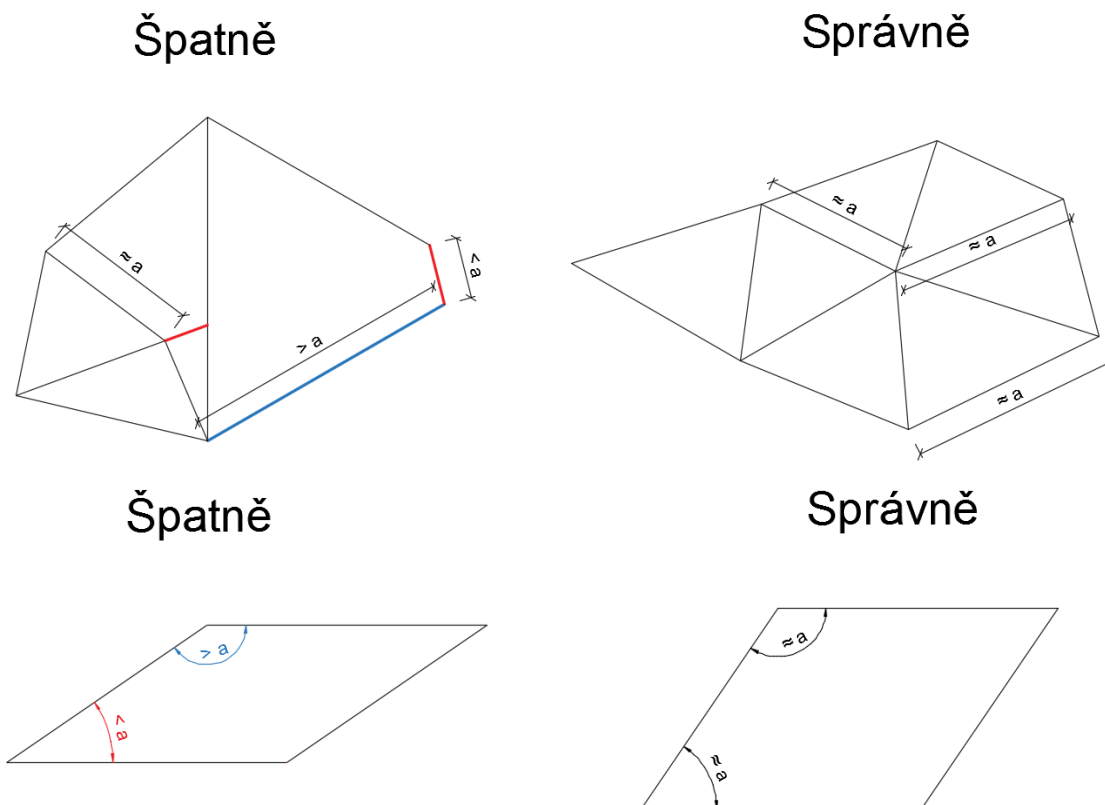


Obrázek 38: Základní tvary 3D výpočetních buněk--: čtyřstěn, jehlan, pětistěn, šestistěn



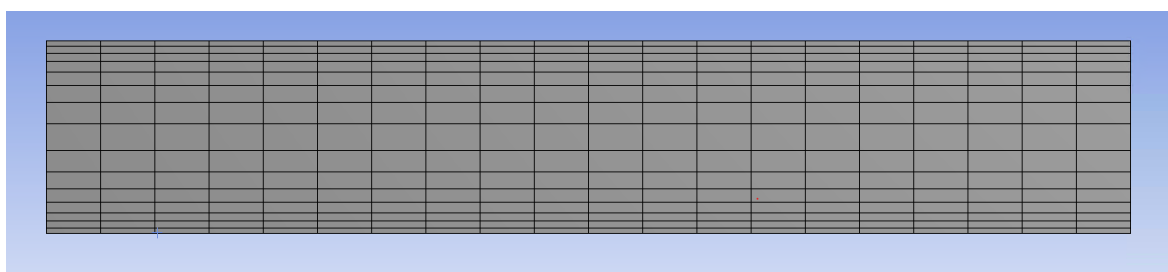
Obrázek 39: Geometrie před a po generaci výpočetní sítě

Pro dosažení přesných výsledků a vytvoření modelu odpovídajícího realitě musíme sledovat kvalitu vytvořené výpočetní sítě. Špatná kvalita sítě vede k nepřesným výsledkům a/nebo pomalé konvergenci, případně k divergenci problému. Pro stanovení kvality sítě potřebujeme zavést pojem „nesouměrnost“. Asymetrie a nepravidelnost buněk vede ke ztrátě přesnosti výpočtů a vede k chybám. Nesouměrnost buněk můžeme určit na základě rovno strannosti buněk a odchylce od normalizovaného úhlu:





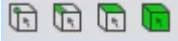
Obrázek 40: Příklady špatného a správného tvaru buněk

Vzhledem k tomu, že dopočítané hodnoty jsou „zachovány“ ve středu buňky, v zájmových oblastech, kde potřebujeme nejpřesnější a nejdetailejší výsledky, je třeba zahustit síť. Přejít mezi velkými a menšími buňkami musí být plynulý, bez náhlých změn rozměrů buněk.



Obrázek 41: Příklad správně zahuštěné sítě

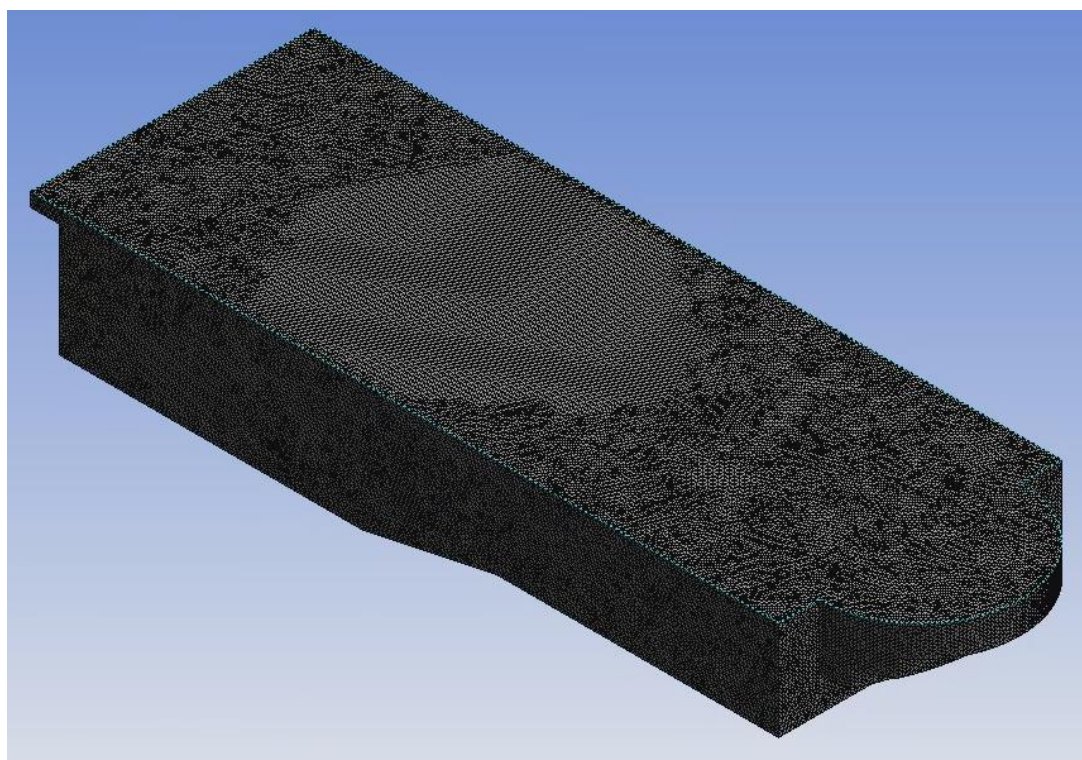
Pro účely přesnějšího nastavení kvality sítě budeme potřebovat nástroje, které ovládají tvar a velikost výpočetních buněk:

- Sizing  – Určuje rozměr, počet a míru toleranci.
- Face mashing  – Poskytuje seřazení buněk do stejnorozměrné textury.
- Select  – Charakterizuje konkrétní objekt pro edici – Roh, Hrana, Strana nebo celý Prostor.

I s ohledem na to, že pomocí uvedených nástrojů můžeme popsat celou síť, generování této sítě se provádí automaticky. Program ukáže sám, jaká oblast se nedá generovat s nastavenými parametry velikosti buněk. V takovém případě generace výpočetní sítě zanedbává editaci sítě v takových místech.

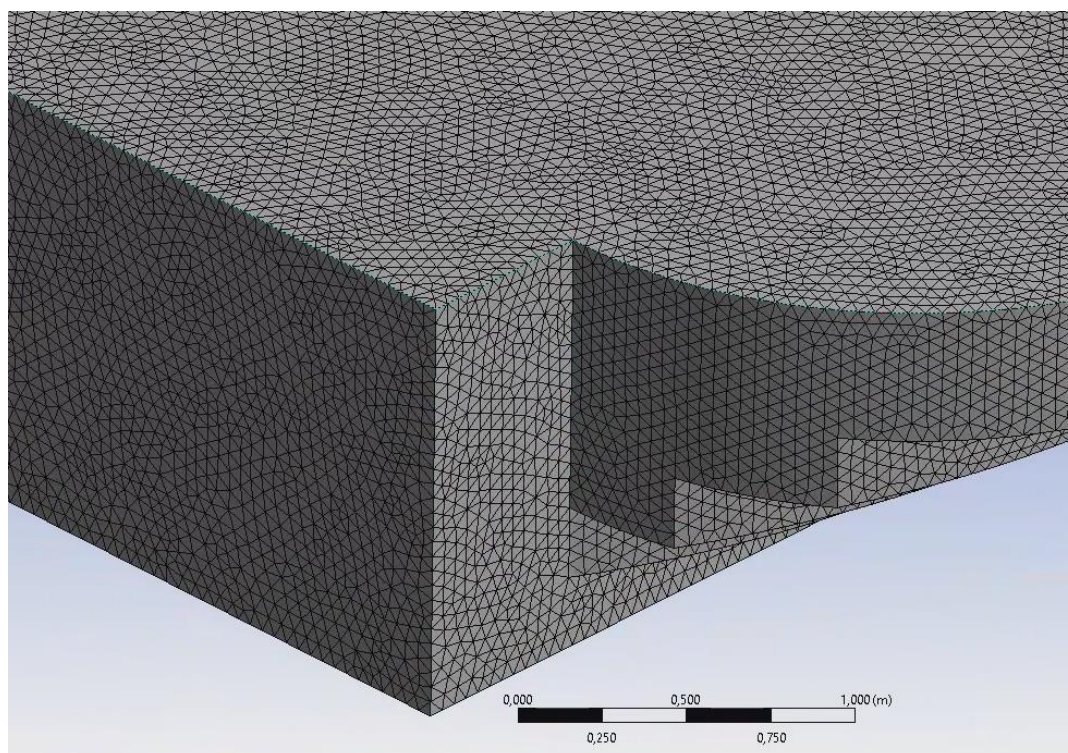
Pro případ složitějšího tvaru vstupní geometrie bude obtížné kontrolovat vytvoření sítě. Proto budeme brát v úvahu jen maximální velikosti jednotlivé výpočetní buňky v síti bez zvláštních omezení. Takové řešení podporuje fakt, že když pro výpočet vyhoví rozměr největší buňky, ostatní přispěje jen k přesnějšímu výsledku.

Po generaci výpočetní sítě vypadá takto:



Obrázek 42: Výpočetní síť bazénu VAGNERpool

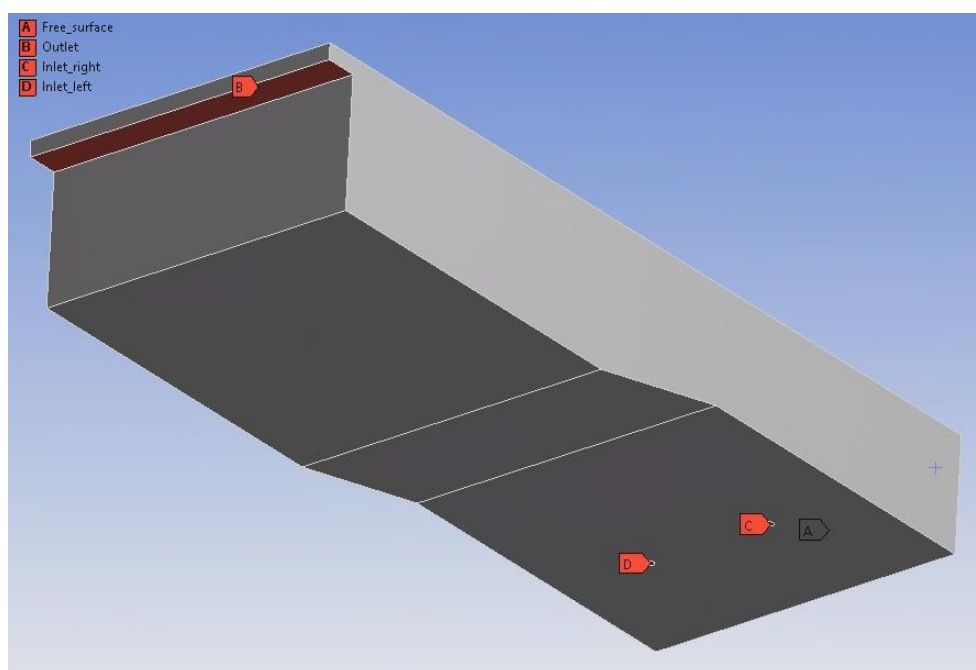




Obrázek 43: Výpočetní síť bazénu VAGNERpool (zvětšený obrázek)

Jak je vidět na obrázku 43, síť má poměrně stejnorozměrné buňky v textuře. Objem největší výpočetní buňky nepřesahuje  $125 \text{ cm}^3$ , což je krychle se stranami o velikosti 5 cm. Celkový počet všech buněk je cca 1 360 000.

Pro snadnější nastavení okrajových podmínek v následujícím kroku je nutno vybrat a pojmenovat vtoky (inlet\_left/inlet\_right), výtok (outlet) a volnou hladinu (free\_surface). To je možné pomocí nástrojů *select* a funkci *Create Named Selection*.



Obrázek 44: Oblasti okrajových podmínek

## 6.7. Parametry modelu

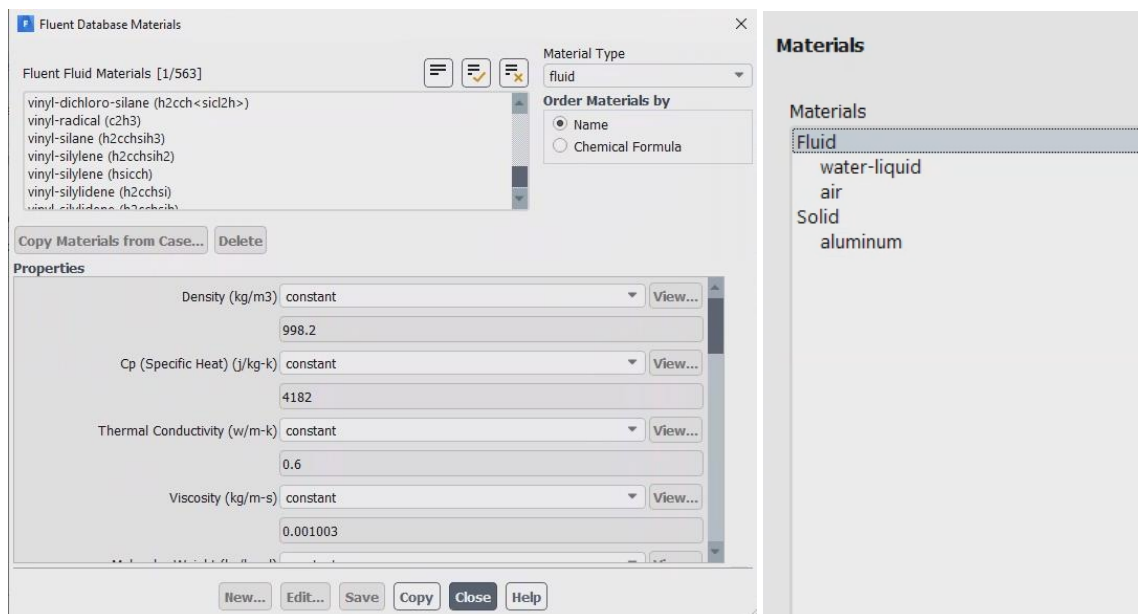
Jedním ze základních parametrů nastavení modelu je nastavení parametrů řešení. Program nabízí 3 typy nastavení: čas, vztah rychlosti a typ základního řešení. Jelikož výsledky modelu budeme porovnávat s opravenými výsledky měření, které ukazuje jednoznačně rychlostní profily, není třeba modelovat průtok proměnlivý v čase, ale považovat ho jako ustálený. Rychlosti jsou v absolutním systému a typ řešení nastavujeme na základě tlaku.

Ve zvoleném souřadném systému budeme také uvažovat gravitační zrychlení ve směru osy Y hodnotou  $-9.807 \text{ m/s}^2$ . (viz. Obr. 45)



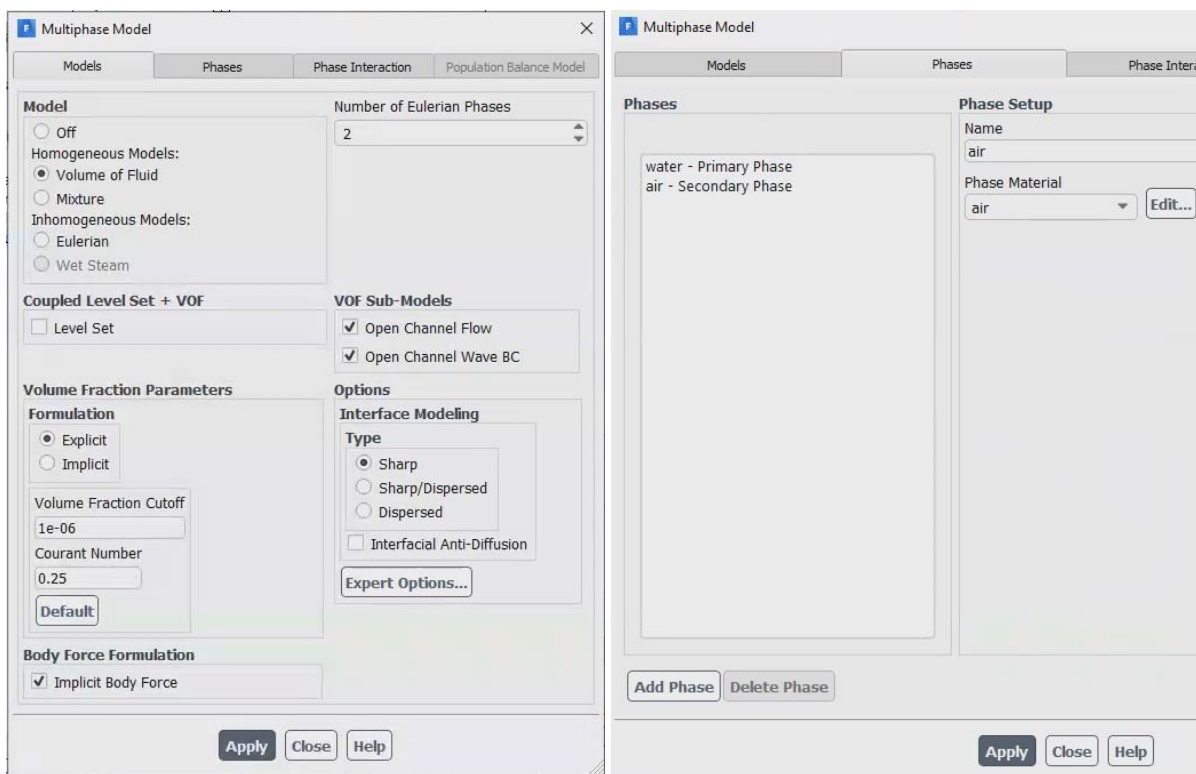
Obrázek 45: Ukázka nastavení základních parametrů modelu

Dalším krokem je přidání primárního a druhotného materiálu média, které bude uvnitř modelovaného bazénu. Vzduch v systému je nastaven automaticky, ale jako primární fáze. Z knihovny materiálů vybereme tekutou vodu a přidáme do pracovních materiálů.



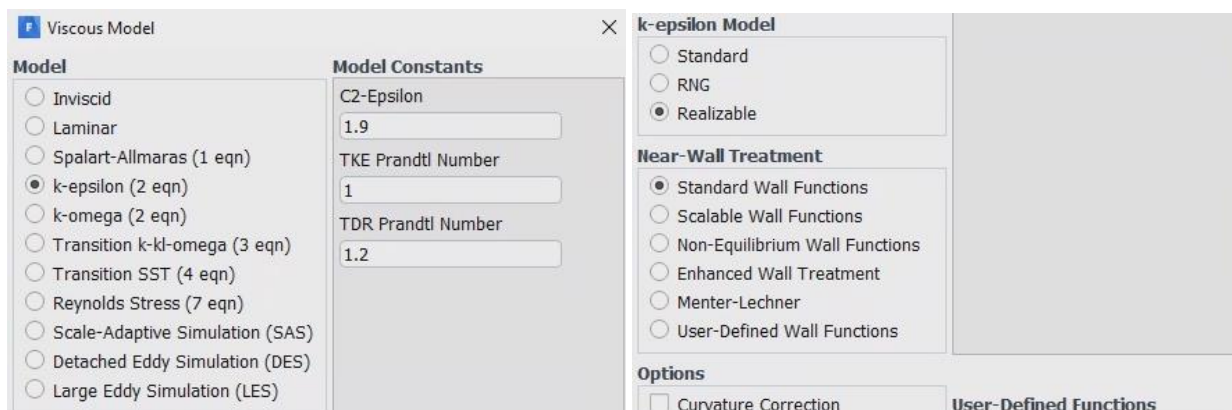
Obrázek 46: Ukázka nastavení materiálů medii

Jakmile máme materiál pro dvě média, můžeme upravit nastavení tak, aby řešení bylo chápáno tak, že máme několik fází a, tím pádem, i beztlakové proudění s volnou hladinou.



Obrázek 47: Ukázka nastavení materiálu

Dalším krokem je výběr turbulentního modelu, který je popsán v kapitole 6.5.



Obrázek 48: Ukázka nastavení turbulentního modelu

Ostatní parametry nastavení k-e modelu necháváme v standardním stavu.

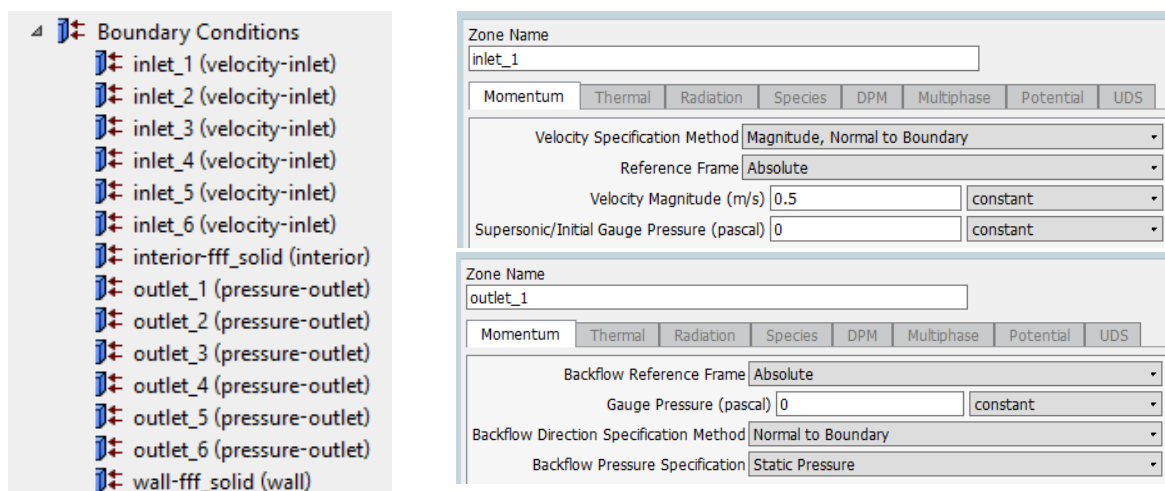
## 6.8. Okrajové podmínky

Obecně pro řešení úlohy proudění v bazénu, existují dvě okrajové podmínky, to jsou:

- Okrajová podmínka na hranici oblasti, tedy na rozhraní stěn a vody a hladiny;
- Okrajové podmínky pro samotnou oblast proudu – to je oblast náplně bazénu.

Třídění okrajových podmínek podle postupu jejich nastavení v programu:

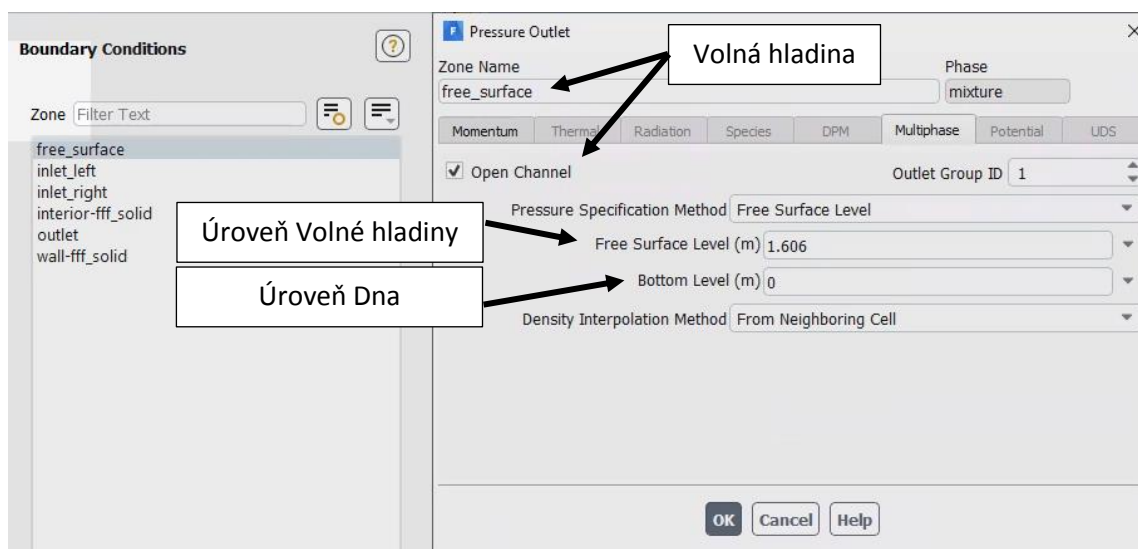
- Vstupní podmínka rychlosti – určuje rychlost na vstupech do bazénu
- Podmínka na stěnách – určuje míru tření o drsný povrch stěn bazénu a překlenutí popisu proudění v mezní vrstvě pomocí tzv. standardní stěnové funkce;
- Výstupní podmínka tlaku – určuje tlak na výtoku



Obrázek 49: Ukázka nastavení okrajových podmínek

Kromě toho, bude nastavena podmínka volné hladiny, která pomáhá modelu chápat, že prostor není uzavřený. V systému to bude vypadat jako tlaková podmínka výstupu.

Zároveň, u každé okrajové podmínky bude zmíněno rozhraní kapalná a plynná fáze, což se zadává do systému ve formě hloubky. Tuto hloubku zvětšíme o cca 6 mm proto, aby počáteční řešení dokázalo najít cestu od míst vtoku do přelivné hrany. V opačném případě řešení nekonverguje.



Obrázek 50: Nastavení okrajových podmínek volné hladiny

U podmínek vtoku je třeba nastavit vtokovou rychlost pro levou a pro pravou trysku. Tuto rychlost nastavíme stejnou jako v bazénu prototypu, u kterého známe parametry čerpadla a aktuální nastavení během měření.



Obrázek 51: Nastavení řídicí jednotky a parametry čerpadla

Na obrázku 49 da lze přečíst následující parametry:

– Řídící jednotka:

Rychlost = 1800 otáček za minutu

– Parametry čerpadla:

Maximální rychlost = 3450 otáček za minutu [ot./min];

Maximální průtok = 40 metrů krychlových za hodinu [m<sup>3</sup>/hod].

Řízení průtoků změnou otáček čerpadla, umožňuje přizpůsobení výkonu, požadavkům potrubního systému, díky plynulé změně otáček. Pokud roste průtok lineárně zvětšuje se odpor v trubním systému kvadraticky. Stejným způsobem funguje i čerpadlo, kde lineárně rostou otáčky. Z tohoto důvodu je malou změnou otáček pokryta velká provozní oblast. Pro odstředivá čerpadla platí na základě kinematické podobnosti zákony afinity. Při tomto způsobu ovládání řízení je využit frekvenční měnič.

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Rovnice 15: Afinitní zákon}$$

Pomocí rovnici 14 najdeme aktuální průtok během měření:

$$40 \frac{1800}{3450} = 20,87 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{což je} \quad 0,0058 \text{ m}^3/\text{s}$$

Abychom dosáhli obdobných výsledků modelování jako výsledky měření, provedeme stručnou analýzu a budeme předpokládat, že průtok pravou tryskou je dominantní. Je to vidět i na svislých rychlostních polích:

Tabulka 4: Rychlostní pole Z s rychlostmi uvedenými v m/s

| h10 | A      | E      | B      | C      | D      |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | -0,986 | -0,294 | -0,573 | -0,583 | -0,562 |
| 2   | 0,100  | -0,333 | -0,194 | -0,054 | 0,153  |
| 3   | 0,237  | -0,723 | -0,176 | -0,630 | -0,005 |
| 4   | 0,456  | -0,291 | -0,357 | 0,144  | -1,223 |
| 5   | 0,067  | -0,446 | 1,828  | -0,315 | 3,295  |

| h104 | A      | E      | B      | C      | D       |
|------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1    | -1,139 | -0,265 | -1,747 | -0,569 | -1,202  |
| 2    | -0,257 | -0,672 | -0,787 | -0,407 | -0,181  |
| 3    | 0,443  | -0,760 | -0,302 | -0,321 | -0,124  |
| 4    | -0,359 | -0,809 | -2,384 | 0,035  | -12,935 |
| 5    | 1,413  | -0,704 | 1,943  | 0,027  | -0,362  |

| h57 | A      | E      | B      | C      | D      |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | -0,839 | 0,197  | -0,996 | -0,298 | -1,093 |
| 2   | -0,373 | -0,520 | -0,736 | 0,034  | 0,044  |
| 3   | 0,487  | -1,021 | -0,839 | -0,284 | -0,005 |
| 4   | 0,053  | -0,846 | -1,643 | -0,233 | -2,746 |
| 5   | 1,517  | -1,031 | 3,256  | -1,446 | -0,860 |

| h150 | A      | E      | B      |
|------|--------|--------|--------|
| 1    | -0,327 | -0,354 | -0,354 |
| 2    | -0,280 | -0,338 | -0,596 |
| 3    | -0,085 | -0,394 | 0,479  |
| 4    | 0,067  | -0,433 | -1,873 |
| 5    | -0,025 | -0,413 | -1,150 |

Dle výsledků měření vycházíme z toho, že pravou tryskou bude téct 75 % celkového průtoku, což je 0,0044 m<sup>3</sup>/s.

S ohledem na průměr kruhových otvorů, které imitují trysky, dopočítáme rychlost v pravém a levém vtoku.

$$V = \frac{Q}{S} \text{ kde } S = \pi r^2 \quad \pi 0,05^2 = 0,0079 \text{ m}^2$$

$$\text{Pravá tryska } \frac{0,0044}{0,0079} = 0,554 \text{ m/s} \quad \text{Levá tryska } \frac{0,0014}{0,0079} = 0,185 \text{ m/s}$$

Aplikujeme tyto hodnoty do nastavení vtokových rychlosti okrajových podmínek vtoků:

Zone Name: inlet\_left Phase: mixture

Open Channel Wave BC

Segregated Velocity Inputs

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Reference Frame: Absolute

Averaged Flow Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Averaged Flow Velocity Magnitude (m/s): 0.185

**Turbulence**

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Zone Name: inlet\_right Phase: mixture

Open Channel Wave BC

Segregated Velocity Inputs

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Reference Frame: Absolute

Averaged Flow Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Averaged Flow Velocity Magnitude (m/s): 0.554

**Turbulence**

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

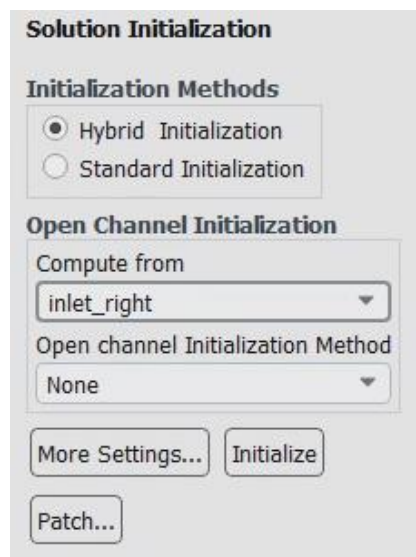
Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Obrázek 52: Vtokové okrajové podmínky

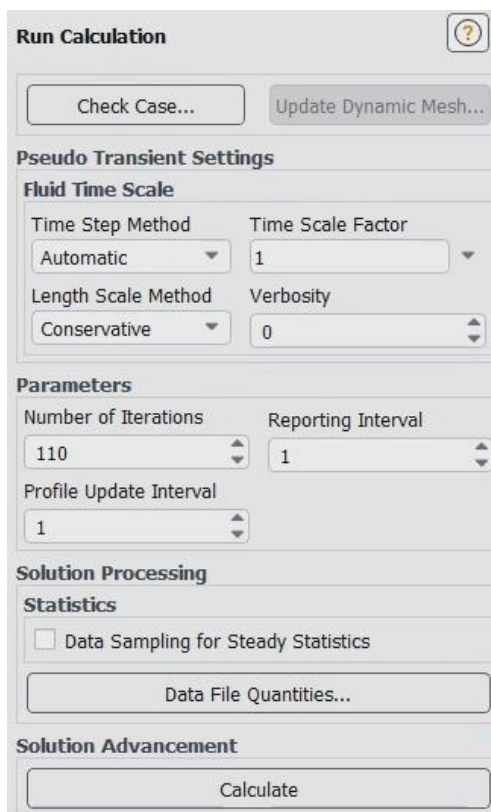
## 6.9. Výpočet

Před zahájením samotného výpočtu, je třeba spustit inicializace nastavených procesů.



Obrázek 53: Inicializace

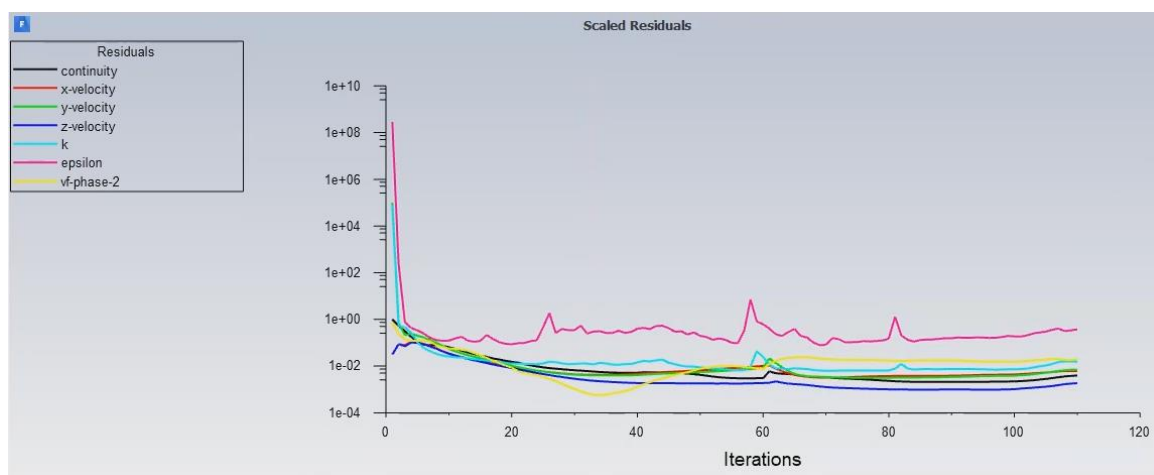
V položce „Run Calculation“ nastavíme počet iterací, tj. kolikrát se systém musí pokusit o řešení úlohy. Každá následující iterace zohledňuje do výpočtu výsledky předchozího pokusu a snaží se omezit velikost reziduí. Čím větší jsou rezidua, tím je model míň fyzikálně spolehlivý. Pro naše účely bude stačit 110 iterací.



Obrázek 54: Nastavení počtů iterací



Během výpočtů se bude kreslit graf aktuálních reziduí za aktuální iterační krok.



Obrázek 55: Graf iteračního postupu

Ideálně bychom považovali přípustné reziduum o velikosti kolem 0,001 metru, ale v průběhu vypracování této práce některá rezidua vychází větší. V takovém případě budeme uvažovat nejlepší dosažené výsledky jako pracovní vhodné.

| iter | continuity | x-velocity | y-velocity | z-velocity | k          | epsilon    | vf-phase-2 |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 110  | 3.9616e-03 | 6.1152e-03 | 6.9866e-03 | 1.8529e-03 | 1.5389e-02 | 3.7435e-01 | 1.9619e-02 |

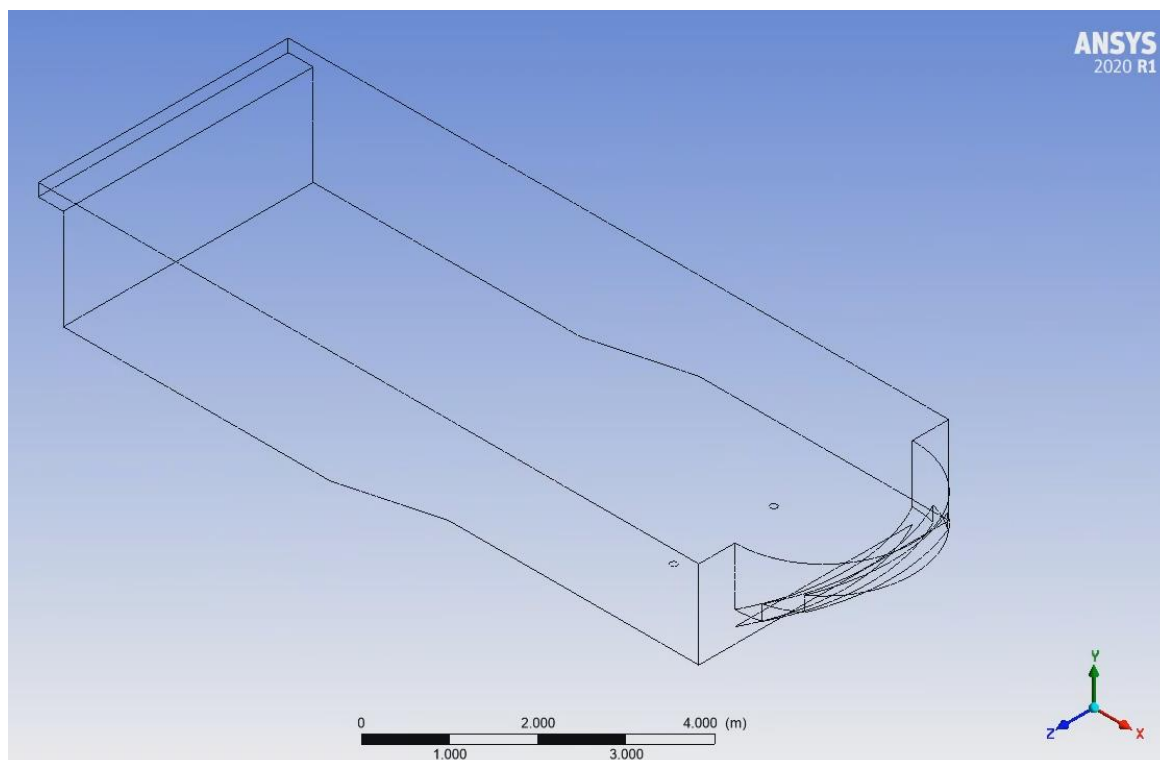
Obrázek 56: Výsledek poslední iteraci – rychlosti v jednotlivých osách v m/s

Po vypočítání posledního pokusu (iterací), což v našem případě je 110-tá iterace (viz.obr. 54) výsledky výpočtů budou uloženy v systému pro zobrazení různých tvarů.

V následující kapitole bude zmíněno několik výsledků různých nastavení řešiče a okrajových podmínek. Je to proto, že účelem postupného modelování je nalezení podmínek proudění, které by odpovídaly realitě. Veškeré změny okrajových podmínek a jejich vliv na proudění budou taktéž zmíněny v následující kapitole.

## 6.10. Přehled výsledků




V kapitole 6.9 byly nastaveny rychlostní podmínky vtoku 0,185 m/s v levé trysce a 0,554 m/s v pravé trysce. Pro přehledné zobrazení výsledků aktuálních nastavení použijeme podprogram ANSYS CFD-Post. Po nezbytném vypracování předchozích kroků nastavení, podprogram hned po plném spuštění ukáže průhledný model geometrii bazénu (viz.obr. 57).




Obrázek 57: Průhledný model bazénu v CFD-Post.

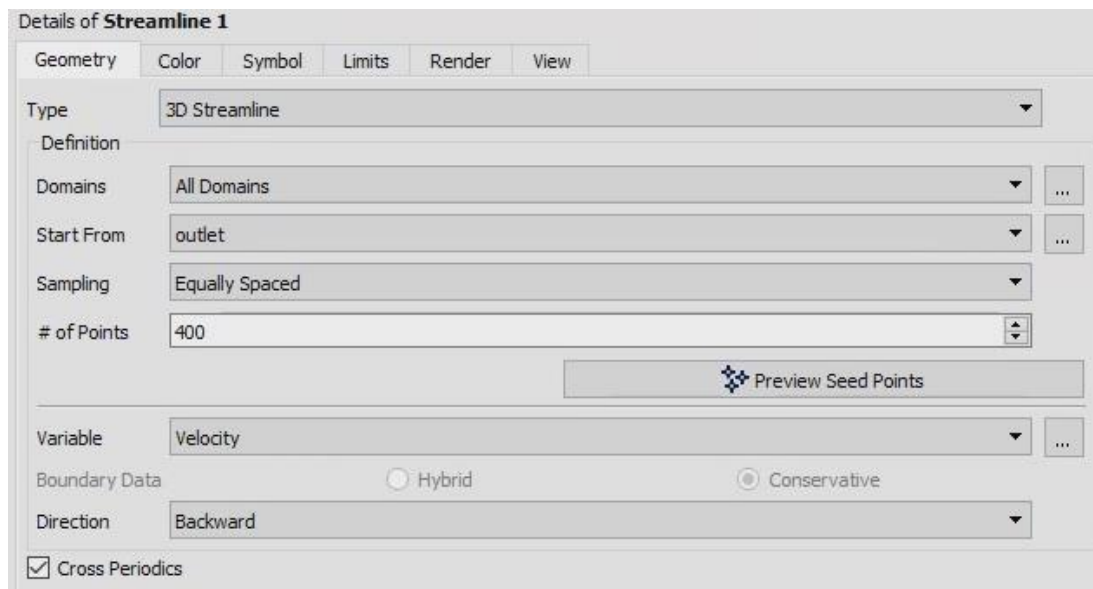
Pomocí následujících nástrojů je možné nastavit potřebné řezy pro následné zobrazení rychlostních profilů. Také použijeme některé nástroje pro zobrazení celého charakteru proudu a detekce případných vad způsobených chybnými nastaveními modelu nebo řešiče.

Použité nástroje CFD-Post:

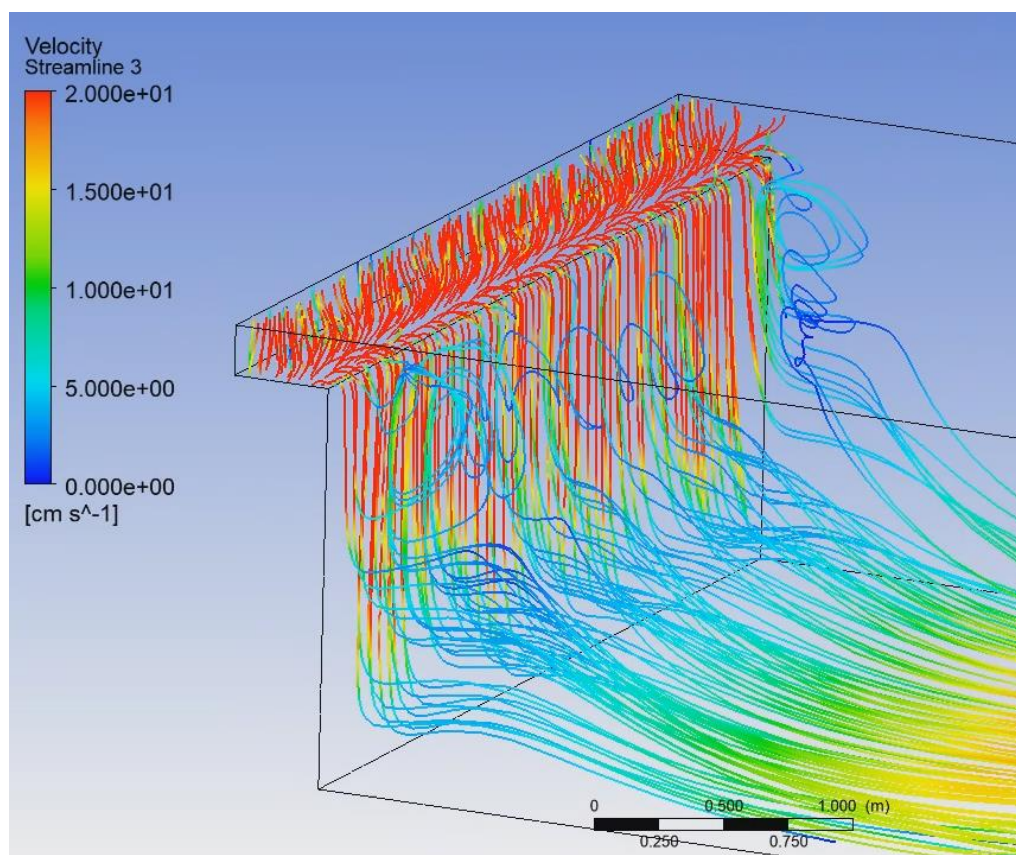
- Plocha  Plane – Kreslí řez podél nastavených os a vzdáleností.
- Isoplocha  Isosurface – Kreslí zakřivenou plochu na rozhraní hodnot.
- Kontura  – Obarví plochu v závislosti na vybrané hodnotě (rychlost, tlak, průtok atd.)

Nejdůležitější výsledky pro nás jsou rychlostní profily podél osy X, jelikož, hlavně, rychlostí ve směru X nejvíce přispívají k výměně vody v bazénové nádrži.

Kromě toho pro reprezentaci charakteru proudu můžeme použít nástroj „Streamline“,  který schopen ukázat trajektorii jednotlivých paprsků vody v bazénu:



Obrázek 58: Nastavení nástroje Streamline.

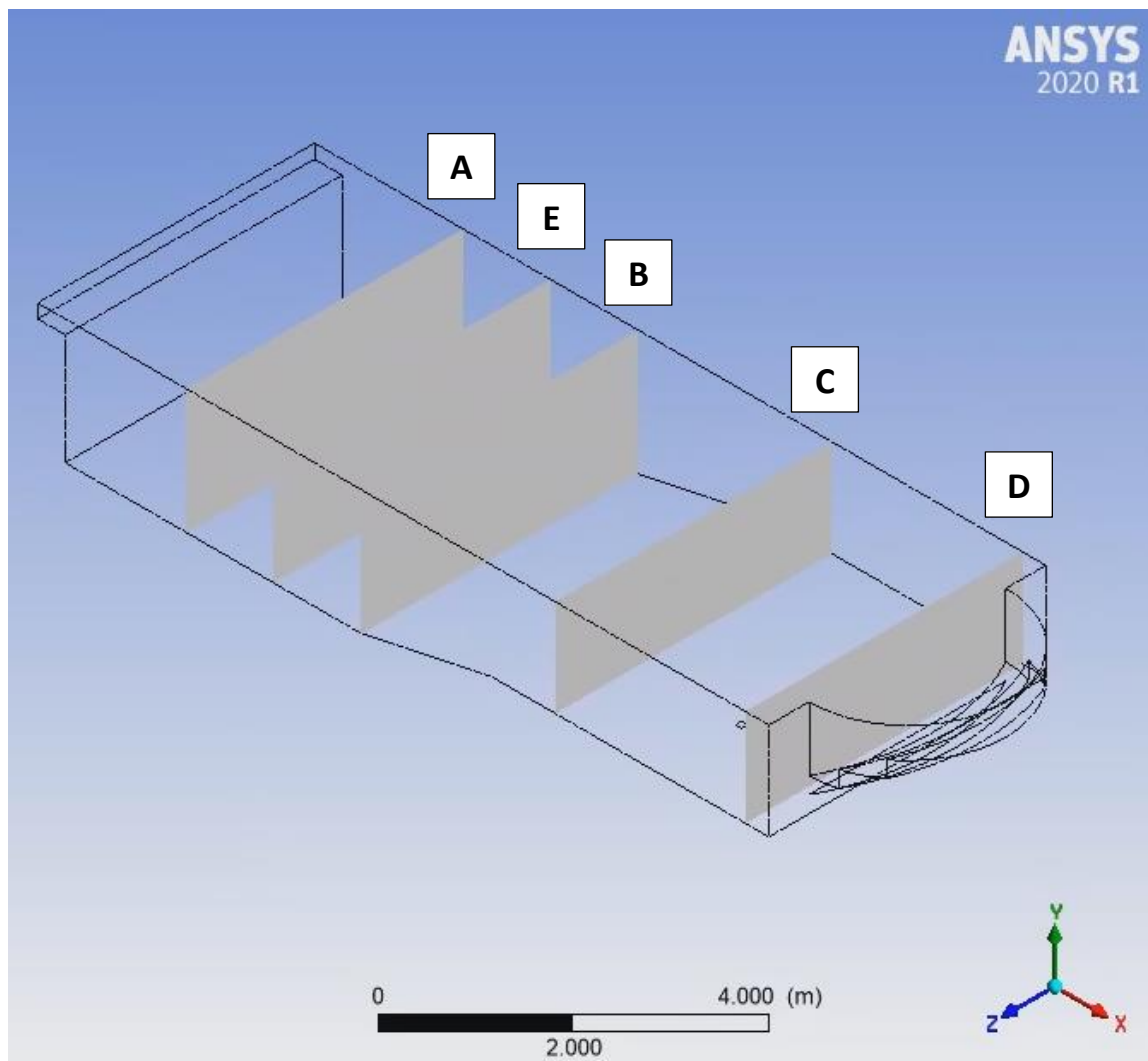


Obrázek 59: Detail paprsku proudu na výtoku do přelivného žlábků.

Jak je vidět na obrázku 59 krátké paprsky na přelivné hraně reprezentují tok vzdušné fázi. Paprsky podél stěny ukazují tok vody do přelivného žlábků.

Kvůli tomu že výpočetní výkon je omezen, nedá zobrazit dostatečný počet paprsků aby zcela popsal proudění celým tělesem bazénu. Tím pádem program ukáže zadaný počet dominantních paprsků s největšími dosaženými rychlostmi.

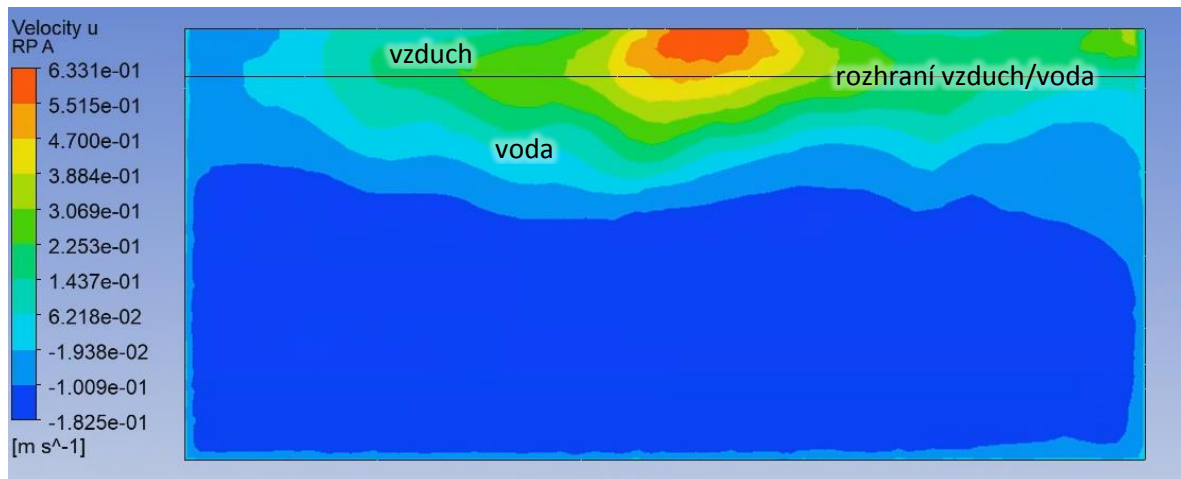
V této fázi už můžeme pořídit z modelu rychlostní profily.



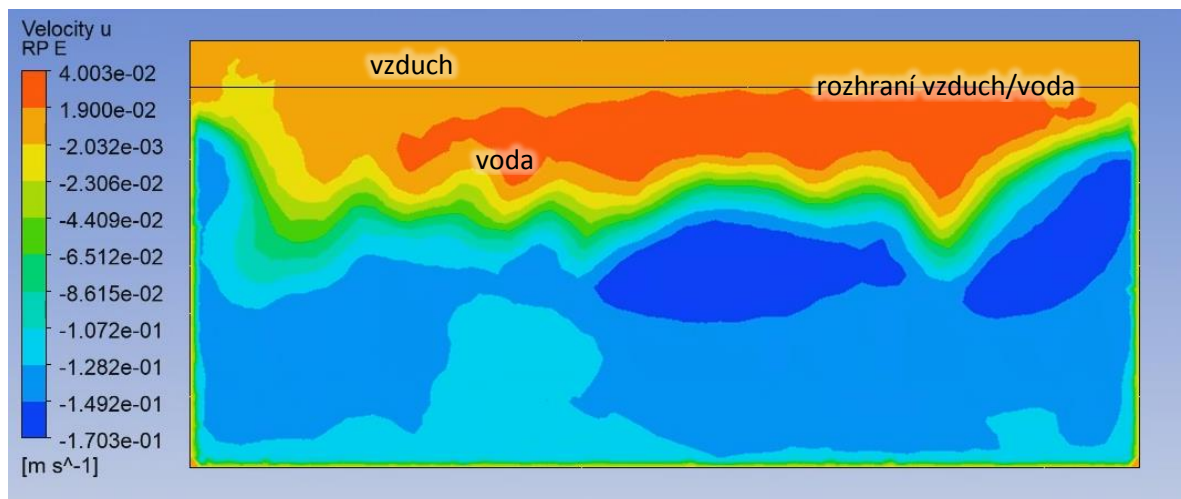
Obrázek 60: Přehled podélných řezů.

Každý z těchto profilů bude zbarven v závislosti na rychlosti proudu v příslušném místě. Kladné hodnoty rychlosti ukazují proud směřující zpátky ke tryskám, záporné hodnoty ukazují proud směřující k přelivnému žlabu.

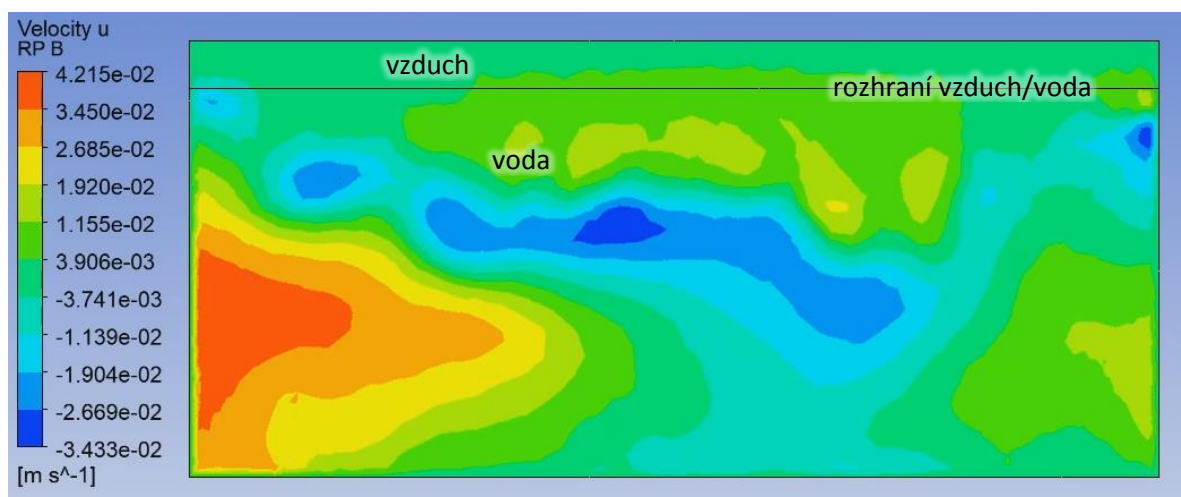
Jak bylo zmíněno v kapitole 6.6.1., horní část modelovaného bazénu je vyplněna vzduchem. Tím pádem barvy profilu v této oblasti ukazují velikost rychlosti vzduchu.



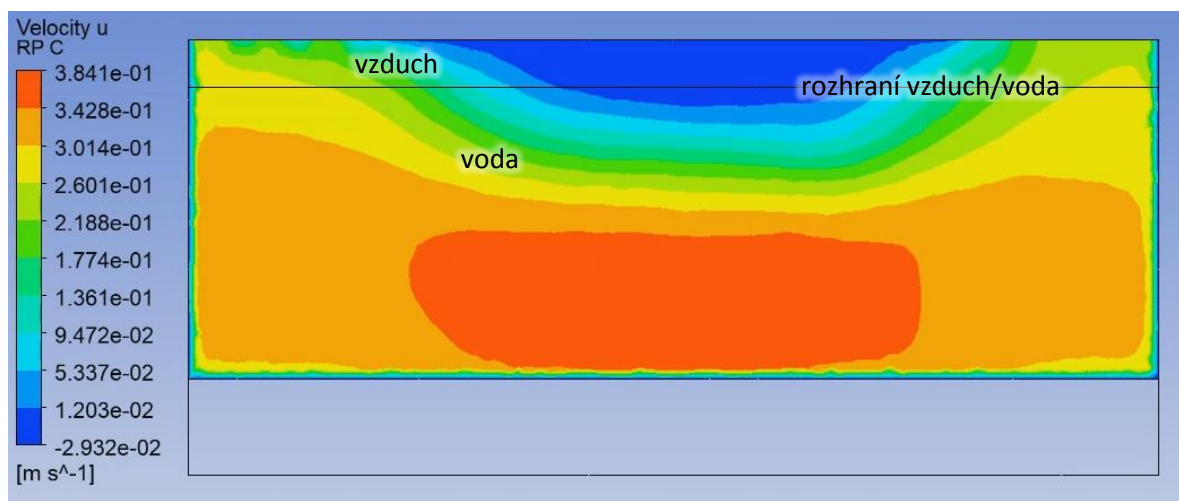
Obrázek 61: Modelovaný rychlostní profil A.



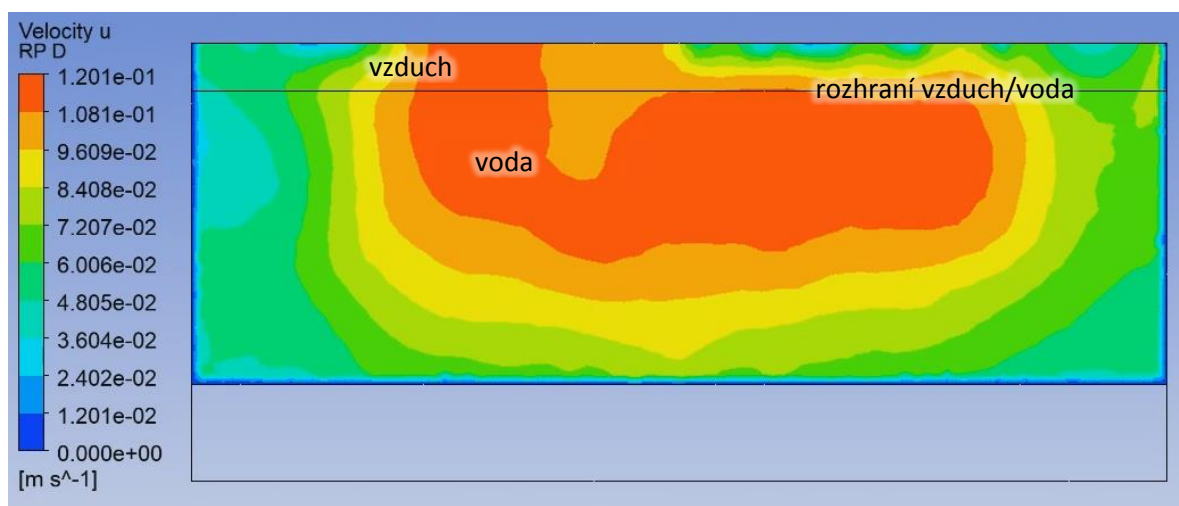
Obrázek 62: Modelovaný rychlostní profil E.



Obrázek 63: Modelovaný rychlostní profil B.



Obrázek 64: Modelovaný rychlostní profil C.



Obrázek 65: Modelovaný rychlostní profil D.

Další kapitola bude zaměřena na porovnání výstupů z modelu a výsledků terénních měření.

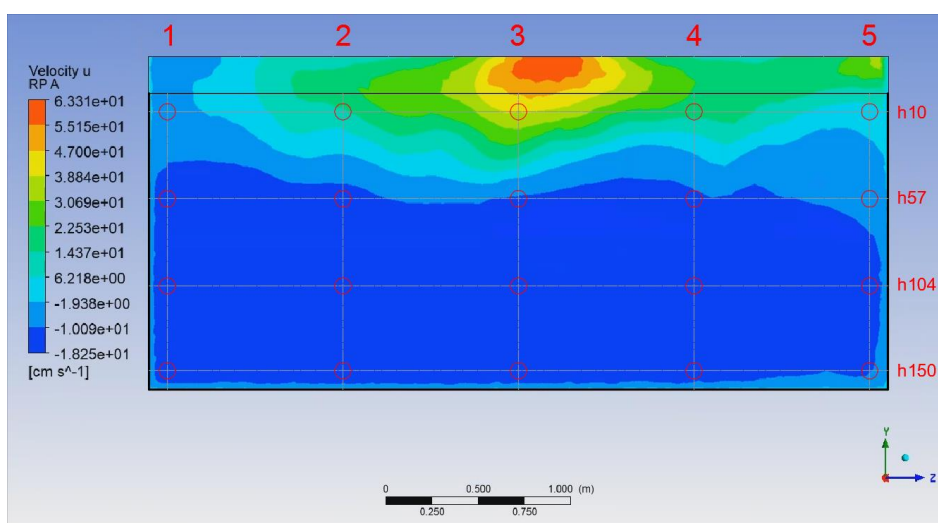
## 7. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Hlavním cílem práce je posoudit, zda matematický model proudění vody v bazénu odpovídá proudění, který byl změřen v reálném bazénu. Taktéž se pokusím o stanovení míry shody modelovaného proudění a naměřeného.

### 7.1. Porovnání

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1, porovnání modelu s prototypem a posouzení jejich shody bude provedeno na základě vizuálně-numerického pozorování rychlostních profilů. Pro tento účel poopravíme vizuální tvar modelovaných rychlostních profilů následujícím způsobem:

Nejdřív je třeba stanovit přesnou polohu pozorovacích bodů v profilu.

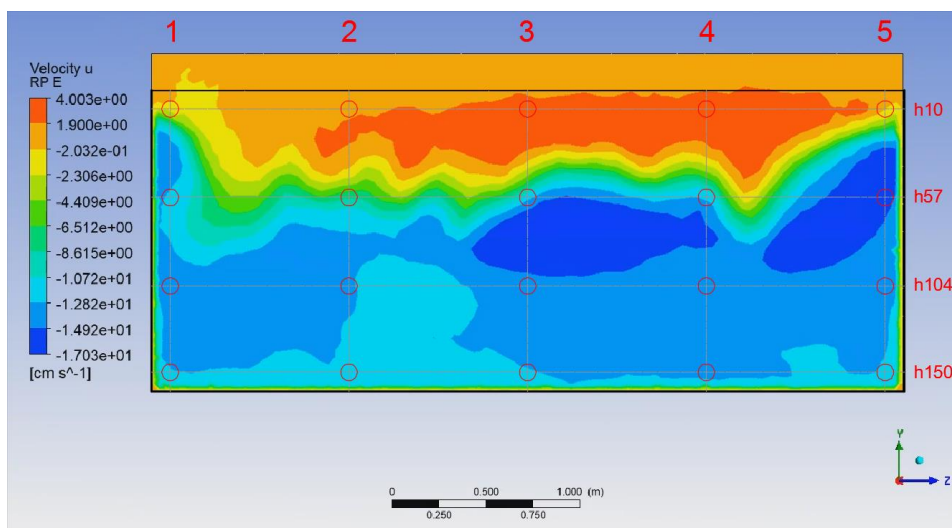


Obrázek 66: Modelovaný rychlostní profil A s rozdělovací mřížkou

Potom odečteme podle barvy příslušnou hodnotu rychlosti v bodech a zároveň převedeme na vhodné jednotky (cm/s)

Tabulka 5: Modelovaný rychlostní profil A přetvářený s rychlostmi v cm/s.

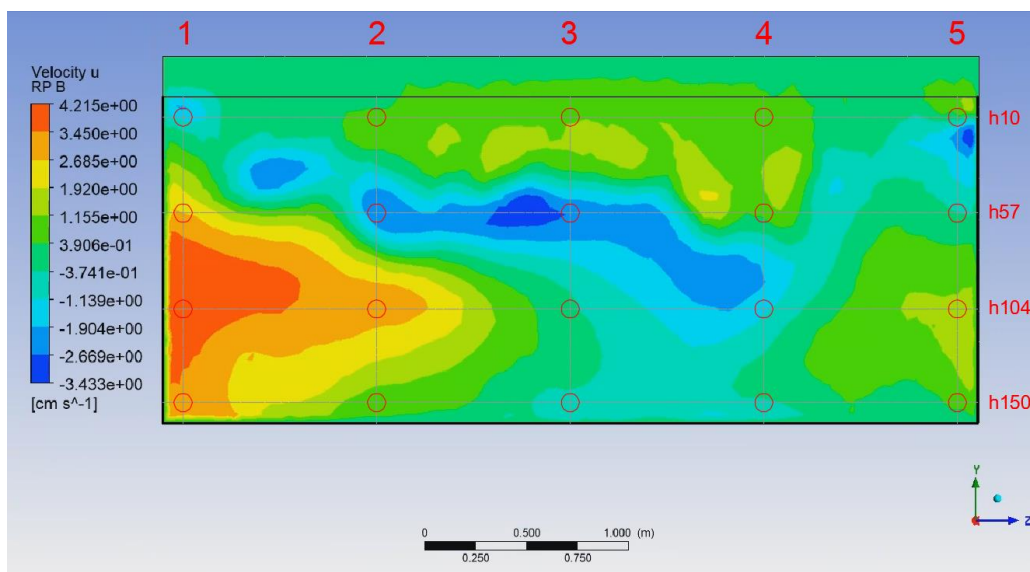
| <b>A</b> | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| h10      | 3.248   | 17.286  | 38.653  | 13.030  | -4.383  |
| h57      | -7.911  | -11.092 | -10.965 | -12.946 | -12.912 |
| h104     | -11.325 | -14.113 | -15.960 | -17.653 | -15.042 |
| h150     | -10.153 | -12.250 | -13.313 | -14.041 | -12.969 |



Obrázek 67: Modelovaný rychlostní profil E s rozdělovací mřížkou s rychlostmi v cm/s.

Tabulka 6: Modelovaný rychlostní profil E přetvářený s rychlostmi v cm/s.

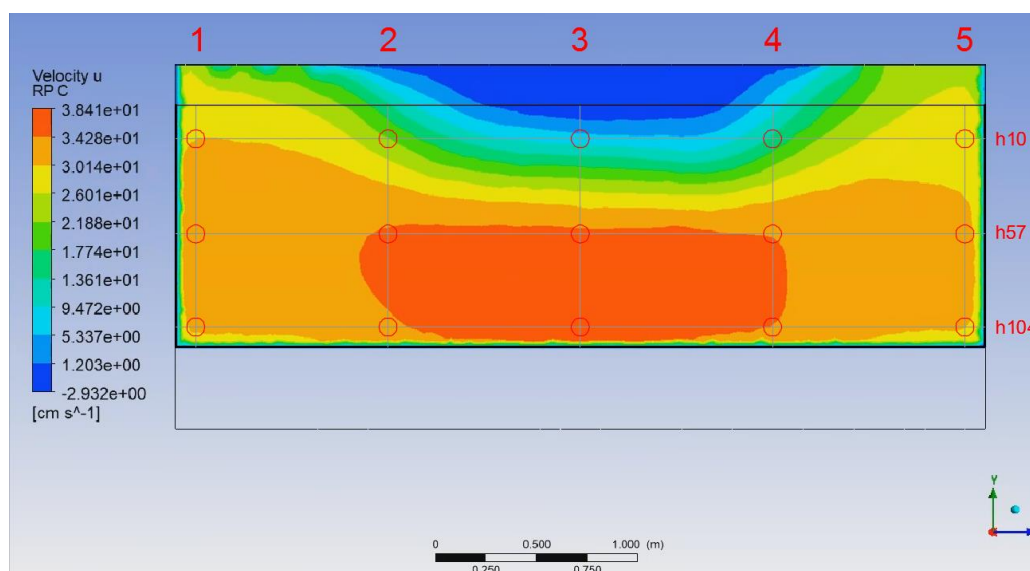
| <b>E</b> | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| h10      | -0.422  | 2.906   | 2.506   | 1.581   | -1.923  |
| h57      | -15.280 | -12.356 | -12.011 | -8.415  | -12.416 |
| h104     | -13.512 | -13.801 | -14.171 | -12.801 | -13.185 |
| h150     | -12.541 | -13.194 | -12.622 | -12.573 | -12.510 |



Obrázek 68: Modelovaný rychlostní profil B s rozdělovací mřížkou s rychlostmi v cm/s.

Tabulka 7: Modelovaný rychlostní profil B přetvářený s rychlostmi v cm/s.

| <b>B</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | 0.260  | 0.622  | 1.066  | 0.522  | -1.443 |
| h57      | -0.367 | 0.652  | -2.562 | -2.460 | 2.691  |
| h104     | 1.390  | -1.255 | -0.271 | 2.929  | 4.102  |
| h150     | 0.617  | -0.493 | -0.787 | 0.757  | 3.072  |

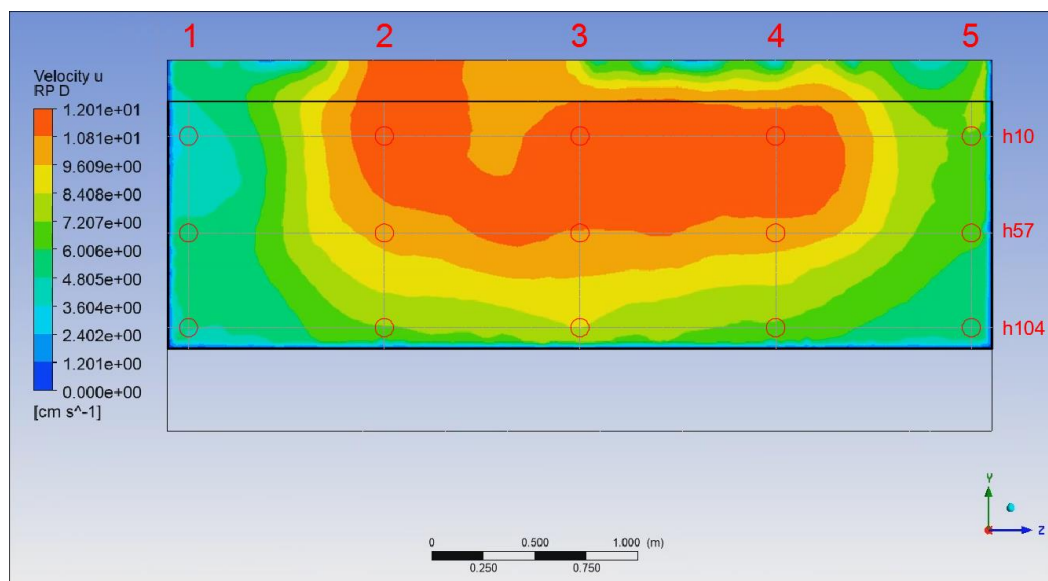


Obrázek 69: Modelovaný rychlostní profil C s rozdělovací mřížkou s rychlostmi v cm/s.

Tabulka 8: Modelovaný rychlostní profil C přetvářený s rychlostmi v cm/s.

| <b>C</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | 27.612 | 11.840 | 2.782  | 19.257 | 29.594 |
| h57      | 30.486 | 32.897 | 33.058 | 33.921 | 31.634 |
| h104     | 30.596 | 34.604 | 38.147 | 34.137 | 31.113 |





Obrázek 70: Modelovaný rychlostní profil D s rozdělovací mřížkou s rychlostmi v cm/s.

Tabulka 9: Modelovaný rychlostní profil D přetvářený s rychlostmi v cm/s.

| D    | 1     | 2      | 3      | 4      | 5     |
|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| h10  | 7.254 | 11.191 | 11.421 | 11.526 | 4.125 |
| h57  | 6.516 | 10.803 | 11.085 | 10.372 | 4.862 |
| h104 | 5.196 | 7.358  | 8.721  | 7.560  | 4.834 |

Dále dopočítáme **absolutní odchylku** modelovaných hodnot rychlostí od naměřených rychlostí:

Tabulka 10: Porovnání profilů naměřených (tabulka vlevo) a modelovaných (tabulka vpravo) rychlostí v cm/s.

| A    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10  | -0.065 | -0.331 | 0.562  | 0.564  | -0.687 |
| h57  | -0.120 | 0.598  | -0.097 | 0.388  | -1.379 |
| h104 | -0.761 | 0.084  | 0.633  | 0.467  | -2.719 |
| h150 | -0.279 | -0.135 | -0.541 | -0.145 | -0.890 |

| A    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10  | 3.25   | 17.29  | 38.65  | 13.03  | -4.38  |
| h57  | -7.91  | -11.09 | -10.97 | -12.95 | -12.91 |
| h104 | -11.32 | -14.11 | -15.96 | -17.65 | -15.04 |
| h150 | -10.15 | -12.25 | -13.31 | -14.04 | -12.97 |

Tabulka 11: Hodnoty absolutních rozdílů naměřených a modelovaných rychlostí v cm/s.

| A    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10  | 3.313  | 17.617 | 38.091 | 12.466 | 3.696  |
| h57  | 7.791  | 11.690 | 10.868 | 13.333 | 11.533 |
| h104 | 10.563 | 14.197 | 16.593 | 18.121 | 12.323 |
| h150 | 9.874  | 12.114 | 12.771 | 13.897 | 12.079 |

Tabulka 12: Porovnání profilů naměřených (tabulka vlevo) a modelovaných (tabulka vpravo) rychlostí v cm/s.

| <b>E</b> | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      | <b>E</b> | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
|----------|--------|--------|--------|-------|--------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| h10      | -0.166 | -0.443 | -0.504 | 0.277 | -0.757 | h10      | -0.422  | 2.906   | 2.506   | 1.581   | -1.923  |
| h57      | -0.241 | -0.190 | 0.155  | 0.246 | -0.219 | h57      | -15.280 | -12.356 | -12.011 | -8.415  | -12.416 |
| h104     | 0.803  | 0.301  | 0.272  | 0.608 | -0.009 | h104     | -13.512 | -13.801 | -14.171 | -12.801 | -13.185 |
| h150     | 0.325  | 0.129  | 1.489  | 0.278 | 0.624  | h150     | -12.541 | -13.194 | -12.622 | -12.573 | -12.510 |

Tabulka 13: Hodnoty absolutních rozdílů naměřených a modelovaných rychlostí v cm/s.

| <b>E</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | 0.256  | 3.349  | 3.011  | 1.304  | 1.166  |
| h57      | 15.038 | 12.166 | 12.165 | 8.662  | 12.197 |
| h104     | 14.315 | 14.102 | 14.443 | 13.409 | 13.176 |
| h150     | 12.866 | 13.323 | 14.111 | 12.850 | 13.134 |

Tabulka 14: Porovnání profilů naměřených (tabulka vlevo) a modelovaných (tabulka vpravo) rychlostí v cm/s.

| <b>B</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     | <b>B</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|--------|--------|--------|--------|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | -1.226 | -0.209 | 0.412  | 0.798  | 0.629 | h10      | 0.260  | 0.622  | 1.066  | 0.522  | -1.443 |
| h57      | 0.083  | -0.246 | -0.806 | 0.901  | 1.095 | h57      | -0.367 | 0.652  | -2.562 | -2.460 | 2.691  |
| h104     | 0.385  | -0.739 | -1.047 | -1.510 | 1.490 | h104     | 1.390  | -1.255 | -0.271 | 2.929  | 4.102  |
| h150     | -0.926 | -1.299 | -2.883 | 0.362  | 2.564 | h150     | 0.617  | -0.493 | -0.787 | 0.757  | 3.072  |

Tabulka 15: Hodnoty absolutních rozdílů naměřených a modelovaných rychlostí v cm/s.

| <b>B</b> | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h10      | 1.486 | 0.831 | 0.654 | 0.276 | 2.072 |
| h57      | 0.450 | 0.897 | 1.756 | 3.361 | 1.596 |
| h104     | 1.005 | 0.516 | 0.776 | 4.439 | 2.611 |
| h150     | 1.543 | 0.806 | 2.096 | 0.395 | 0.507 |

Tabulka 16: Porovnání profilů naměřených (tabulka vlevo) a modelovaných (tabulka vpravo) rychlostí v cm/s.

| <b>C</b> | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      | <b>C</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | 0.761 | -0.292 | -1.480 | -0.260 | -2.369 | h10      | 27.612 | 11.840 | 2.782  | 19.257 | 29.594 |
| h57      | 1.303 | 0.262  | 0.443  | -0.295 | 0.049  | h57      | 30.486 | 32.897 | 33.058 | 33.921 | 31.634 |
| h104     | 3.298 | 1.511  | -0.762 | -0.368 | 0.632  | h104     | 30.596 | 34.604 | 38.147 | 34.137 | 31.113 |

Tabulka 17: Hodnoty absolutních rozdílů naměřených a modelovaných rychlostí v cm/s.

| <b>C</b> | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| h10      | 26.851 | 12.132 | 4.262  | 19.517 | 31.963 |
| h57      | 29.183 | 32.635 | 32.615 | 34.216 | 31.585 |
| h104     | 27.297 | 33.093 | 38.909 | 34.505 | 30.481 |

Tabulka 18: Porovnání profilů naměřených (tabulka vlevo) a modelovaných (tabulka vpravo) rychlostí v cm/s.

| D    | 1      | 2      | 3      | 4       | 5      |
|------|--------|--------|--------|---------|--------|
| h10  | 0.481  | 0.288  | -0.293 | -1.180  | -4.487 |
| h57  | 0.398  | -0.151 | 0.684  | -0.462  | 0.489  |
| h104 | -2.704 | -0.350 | -0.518 | 142.687 | 2.000  |

| D    | 1     | 2      | 3      | 4      | 5     |
|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| h10  | 7.254 | 11.191 | 11.421 | 11.526 | 4.125 |
| h57  | 6.516 | 10.803 | 11.085 | 10.372 | 4.862 |
| h104 | 5.196 | 7.358  | 8.721  | 7.560  | 4.834 |

Tabulka 19: Hodnoty absolutních rozdílů naměřených a modelovaných rychlostí v cm/s.

| D    | 1     | 2      | 3      | 4       | 5     |
|------|-------|--------|--------|---------|-------|
| h10  | 6.772 | 10.903 | 11.713 | 12.706  | 8.611 |
| h57  | 6.118 | 10.954 | 10.401 | 10.835  | 4.373 |
| h104 | 7.900 | 7.709  | 9.239  | 135.128 | 2.835 |

## 7.2. Posouzení shody

Podle obrázků z kapitoly 7.1 je zřejmé, že matematický model za nastavených podmínek poskytuje řádově větší rychlosti, než byly zaměřeny v bazénu-prototypu. Rozdíl se pohybuje kolem desítek centimetrů za sekundu a největších hodnot se nabývá u profilů A a C. Nejvíce obdobných rychlostí se podařilo dosáhnout u profilu B. Jinak, každý z profilů má zcela menší odchylku bliž ke hladině a někdy i u dna.

Z poskytnutých údajů se dá odvodit posouzení, že očekávaná shoda mezi naměřenými a modelovanými hodnotami nebyla dosažena v přípustných rozmezích hodnot rychlosti.

Celkový charakter proudu, který vyplývá z naměřených, tak i modelovaných dat, je jednoznačný a vzájemně koreluje. Průtoky u míst vtoků se pohybují všesměrně, a pak se soustředí u sklonitého dna a směřují ke stěně s přelivnou hranou. Podél této stěny průtok se zvěda k výtoku přes přelivnou hranu.

## 8. ZÁVĚRY

Dle zadání DP byly ve zvoleném bazénu změřeny, matematicky vyhodnoceny bodové rychlosti a následně porovnány s modelovanými rychlostmi pomocí matematického modelu ANSYS Fluent. Porovnání bylo provedeno v jednotlivých zvolených profilech A, B, C, D, E, vzdálenostech 1,2,3,4,5 a jednotlivých hloubkách H10, h57, h104, h150, kde bylo provedeno fyzické změření trojrozměrných rychlostí. Celkem bylo změřeno přes 100 rychlostních bodů s více jak 300 naměřenými rychlostmi ve směru x, y, z.

Z porovnání naměřených rychlostí a rychlostí vzešlých z matematického modelu je zřejmé, že matematický model za nastavených podmínek poskytuje řádově větší rychlosti, než byly zaměřeny v bazénu-prototypu. Rozdíl se pohybuje kolem desítek centimetrů za sekundu a největších hodnot nabývá u profilů A a C. Nejvíce obdobných rychlostí se podařilo dosáhnout u profilu B. Jinak, každý z profilů má zcela menší odchylku blíže k hladině a někdy i u dna.

Celkový charakter proudu, který vyplývá z naměřených, tak i modelovaných dat, je jednoznačný a vzájemně koreluje, přičemž průtoky u míst vtoků se pohybují všesměrně, a pak se soustředí u sklonitého dna a směřují ke stěně s přelivnou hranou.

Velké hodnoty rychlostí, vyskytující se v modelu, lze vysvětlit zvoleným modelem turbulence a funkcí energetických ztrát. Model **k- $\epsilon$** , který byl použit v nastavení modelu, se dá vyměnit modelem **k- $\omega$** . Takový model lépe popisuje funkci ztrát třením podél pevných ploch a uvnitř turbulentních vírů, ale na opačné straně, vyžaduje jemnější výpočetní síť a větší výpočetní výkon. Z toho vyplývá i další opatření ku vylepšení modelu jako jsou: Jemnější výpočetní síť, přesnější geometrie modlu, přesnější nastavení okrajových podmínek, delší výpočetní kroky atd.

Na výsledek mohou mít vliv i naměřená data v insitu z důvodu nedokonalé přesnosti při měření, popřípadě jakákoliv chyba vzniklá během měrné kampaně.

Metodika zpracování naměřených a modelovaných datových řad, která byla vyvinuta během zpracování předložené práce, poskytuje cestu k porovnání dat skutečných s daty matematického modelu. Postupné upřesnění okrajových podmínek a nastavení modelu omezí odchylku a zkalibruje model tak, aby odpovídal realitě.

Vytvořeny model neodpovídá skutečně naměřeným datům, ale popsání metodika porovnání dat zvládne odpovědět na položenou otázku "Odpovídá matematický model skutečnosti a v jaké míře?".

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- KOPECKÁ BARBORA, Enviweb s.r.o. „*Cirkulace, ohřev a čištění vody v bazénu*“, Enviweb s.r.o., <http://www.enviweb.cz/68741>;
- VYHLÁŠKA č. 238/2011 Sb. *o stanovení hygienických požadavků na koupaliště, sauny a hygienické limity písku v pískovištích venkovních hracích ploch* Online-zákoník „zákony pro lidi“, –<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-464>;  
[https://www.zakonyprolidi.cz/cs/201497?text=Vyhl%C3%A1%C5%A1ka%20%C4%8D.%2097%2F2014%20Sb](https://www.zakonyprolidi.cz/cs/201497?text=Vyhl%C3%A1%C5%A1ka%20%C4%8D.%2097%2F2014%20Sb;);
- SKLENÁŘ JOSEF, *Skripta „Balneotechnika I“*, ČVUT FSv v Praze, 1981.
- VÁGNERpool , Katalog 2019, *Technická dokumentace Filtrační nádoby „TRITON - TR 100“* – <https://www.vagnerpool.com/web/download/13729>;
- SonTek ARGONAUT-ADV, *Technická dokumentace akustické sondy*, <https://www.sontek.com/argonaut-adv>.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] – Online škola 3D virtuálního designu – 3dlancer.net
- [2] – ŠŤASTNÝ BOHUMIL, YMIB přednáška 9 - Stavba a provoz bazénů.
- [3] – VYHLÁŠKA č. 238/2011 Sb., Část první §1
- [4] – VYHLÁŠKA č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §17
- [5] – VYHLÁŠKA č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §20
- [6] – VYHLÁŠKA č. 238/2011 Sb., Část čtvrtá §25
- [7] – SKLENÁŘ JOSEF, skripta „Balneotechnika I“ rok vydání. 1921 v Praze § 3.1.4

Ostatní obrázky, schéma, náčrty, výkresy a fotografie byly převzaty z vlastních zdrojů. Výpočetní program a zařízení byly poskytnuty fakultou stavební ČVUT v Praze.

## SEZNAM OBRAZKŮ

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| OBRÁZEK 1: BAZÉNOVÁ NÁDRŽ [1] – 3DLANCER.NET                                                                        | 10 |
| OBRÁZEK 2: SCHÉMA ÚPRAVY BAZÉNOVÉ VODY [2] – DOC. ING. B. ŠTASTNÝ, PH.D. YMIB PŘEDNÁŠKA 9 - STAVBA A PROVOZ BAZÉNŮ. | 12 |
| OBRÁZEK 3: ZMĚNA KVALITY VODY                                                                                       | 16 |
| OBRÁZEK 4: ZAMEZENÍ SMĚŠOVÁNÍ NORNOU STĚNOU                                                                         | 17 |
| OBRÁZEK 5: ZAMEZENÍ SMĚŠOVÁNÍ PŘEPOUŠTĚCÍ NÁDRŽÍ                                                                    | 17 |
| OBRÁZEK 6: ZNÁZORNĚNÍ LIMITUJÍCÍCH FUNKCI VÝMĚNY VODY [7] – BALNEOTECHNIKA I - J. SKLENÁŘ                           | 20 |
| OBRÁZEK 7: UKÁZKA VODNÍCH PAPERŮ                                                                                    | 23 |
| OBRÁZEK 8: UKÁZKA MRTVÝCH PROSTORŮ KOLEM TOKU                                                                       | 23 |
| OBRÁZEK 9: SCHÉMA UMÍSTĚNÍ PŘÍTOKŮ A ODTOKŮ V BAZÉNU                                                                | 24 |
| OBRÁZEK 10: VARIANTY PŘÍTOKOVÉ KVALITY VODY PODLE ZDROJŮ                                                            | 24 |
| OBRÁZEK 11: SÍDLO FIRMY „VAGNER POOL“                                                                               | 26 |
| OBRÁZEK 12: BAZÉN VE VLASTNICTVÍ FIRMY A HLAVNÍ BUDOVA                                                              | 26 |
| OBRÁZEK 13: UKÁZKA VYBAVENÍ BAZÉNU                                                                                  | 27 |
| OBRÁZEK 14: PŘELIVNÝ ŽLAB CHRÁNĚNÝ PLASTOVÉM ROŠTEM.                                                                | 28 |
| OBRÁZEK 15: PŘELIVNÝ ŽLAB A STOČENÁ KRYCÍ PLACHTA.                                                                  | 28 |
| OBRÁZEK 16: ORIENTAČNÍ SCHÉMA VÝMĚNNÉHO SYSTÉMU.                                                                    | 29 |
| OBRÁZEK 17: ÚPRAVNA VODY.                                                                                           | 29 |
| OBRÁZEK 18: LAPAČ VLASŮ A ODSTŘEDIVÉ ČERPADLO.                                                                      | 30 |
| OBRÁZEK 19: PÍSKOVÝ FILTR.                                                                                          | 31 |
| OBRÁZEK 20: TEPELNÝ VÝMĚNÍK.                                                                                        | 31 |
| OBRÁZEK 21: DÁVKOVACÍ ČIDLA A ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA.                                                                      | 32 |
| OBRÁZEK 22: PERISTALTICKÉ PUMPIČKY.                                                                                 | 32 |
| OBRÁZEK 23: LASEROVÝ DÁLKOMĚR OPTEX LX-40                                                                           | 33 |
| OBRÁZEK 24: SOUSTAVA NIVELAČNÍ LATÍ A ADV SONDY                                                                     | 34 |
| OBRÁZEK 25: SVINOVACÍ METR                                                                                          | 34 |
| OBRÁZEK 26: ADV-PŘÍSTROJ „SONTEK“.                                                                                  | 35 |
| OBRÁZEK 27: POMOCNÁ PŘEHRADOVÁ KONSTRUKCE                                                                           | 36 |
| OBRÁZEK 28: POMOCNÁ PŘEHRADOVÁ KONSTRUKCE S OSB DESKY                                                               | 36 |
| OBRÁZEK 29: SPRÁVNÍ STANICE                                                                                         | 37 |
| OBRÁZEK 30: POČÍTAČ NAPOJENÝ NA ADV SONDU                                                                           | 37 |
| OBRÁZEK 31: SCHÉMA BAZÉNU A BODY MĚŘENÍ                                                                             | 38 |
| OBRÁZEK 32: POLOHA BODU A1H10                                                                                       | 39 |
| OBRÁZEK 33: VÝSLEDKY MĚŘENÍ ADV-PŘÍSTROJEM V BODĚ A1H10                                                             | 40 |
| OBRÁZEK 34: UKÁZKA RYCHLOSTNÍHO POLE V PROSTŘEDÍ ANSYS FLUENT                                                       | 46 |
| OBRÁZEK 35: ZÁVISLOST PŘESNOSTI GEOMETRII MODELU NA POČTŮ POLYGONŮ                                                  | 51 |
| OBRÁZEK 36: GEOMETRIE MODELU BAZÉNU VAGNERPOOL                                                                      | 52 |
| OBRÁZEK 37: MÍSTA VTOKŮ DO BAZÉNU (JSOU OZNAČENÝ ORANŽOVĚ)                                                          | 53 |
| OBRÁZEK 38: ZÁKLADNÍ TVARY 3D VÝPOČETNÍCH BUNĚK-: ČTYŘSTĚN, JEHLAN, PĚTISTĚN, ŠESTISTĚN                             | 54 |
| OBRÁZEK 39: GEOMETRIE PŘED A PO GENERACI VÝPOČETNÍ SÍTĚ                                                             | 54 |
| OBRÁZEK 40: PŘÍKLADY ŠPATNÉHO A SPRÁVNÉHO TVARU BUNĚK                                                               | 55 |
| OBRÁZEK 41: PŘÍKLAD SPRÁVNĚ ZAHUŠTĚNÉ SÍTĚ                                                                          | 55 |
| OBRÁZEK 42: VÝPOČETNÍ SÍŤ BAZÉNU VAGNERPOOL                                                                         | 56 |
| OBRÁZEK 43: VÝPOČETNÍ SÍŤ BAZÉNU VAGNERPOOL (ZVĚTŠENÝ OBRAZEK)                                                      | 57 |
| OBRÁZEK 44: OBLASTI OKRAJOVÝCH PODMÍNEK                                                                             | 57 |
| OBRÁZEK 45: UKÁZKA NASTAVENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ MODELU                                                            | 58 |
| OBRÁZEK 46: UKÁZKA NASTAVENÍ MATERIÁLŮ MEDII                                                                        | 59 |
| OBRÁZEK 47: UKÁZKA NASTAVENÍ MATERIÁLU                                                                              | 59 |
| OBRÁZEK 48: UKÁZKA NASTAVENÍ TURBULENTNÍHO MODELU                                                                   | 60 |
| OBRÁZEK 49: UKÁZKA NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK                                                                    | 60 |
| OBRÁZEK 50: NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK VOLNÉ HLADINY                                                             | 61 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| OBRÁZEK 51: NASTAVENÍ ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY A PARAMETRY ČERPADLA                            | 61 |
| OBRÁZEK 52: VTOKOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY                                                 | 63 |
| OBRÁZEK 53: INICIALIZACE                                                              | 64 |
| OBRÁZEK 54: NASTAVENÍ POČTŮ ITERACÍ                                                   | 64 |
| OBRÁZEK 55: GRAF ITERAČNÍHO POSTUPU                                                   | 65 |
| OBRÁZEK 56: VÝSLEDEK POSLEDNÍ ITERACI – RYCHLOSTI V JEDNOTLIVÝCH OSÁCH V M/S          | 65 |
| OBRÁZEK 57: PRŮHLEDNÝ MODEL BAZÉNU V CFD-POST.                                        | 66 |
| OBRÁZEK 58: NASTAVENÍ NÁSTROJE STREAMLINE.                                            | 67 |
| OBRÁZEK 59: DETAIL PAPERSKU PROUDU NA VÝTOKU DO PŘELIVNÉHO ŽLÁBKU.                    | 67 |
| OBRÁZEK 60: PŘEHLED PODÉLNÝCH ŘEZŮ.                                                   | 68 |
| OBRÁZEK 61: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL A.                                           | 69 |
| OBRÁZEK 62: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL E.                                           | 69 |
| OBRÁZEK 63: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL B.                                           | 69 |
| OBRÁZEK 64: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL C.                                           | 70 |
| OBRÁZEK 65: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL D.                                           | 70 |
| OBRÁZEK 66: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL A S ROZDĚLOVACÍ MŘÍŽKOU                      | 71 |
| OBRÁZEK 67: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL E S ROZDĚLOVACÍ MŘÍŽKOU S RYCHLOSTMI V CM/S. | 71 |
| OBRÁZEK 68: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL B S ROZDĚLOVACÍ MŘÍŽKOU S RYCHLOSTMI V CM/S. | 72 |
| OBRÁZEK 69: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL C S ROZDĚLOVACÍ MŘÍŽKOU S RYCHLOSTMI V CM/S. | 72 |
| OBRÁZEK 70: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL D S ROZDĚLOVACÍ MŘÍŽKOU S RYCHLOSTMI V CM/S. | 73 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABULKA 1: ZNÁZORNĚNÍ LIMITUJÍCÍCH FUNKCI VÝMĚNY VODY .....                                                       | 21 |
| TABULKA 2: ZÁVISLOST INTENZITY RECIRKULACE VODY NA HLOUBCE BAZÉNOVÉ NÁDRŽÍ. ....                                  | 25 |
| TABULKA 3: RYCHLOSTNÍ POLE PROFILU A, SLOŽKA X [CM/S]. ....                                                       | 46 |
| TABULKA 4: RYCHLOSTNÍ POLE Z S RYCHLOSTMI UVEDENÝMI V M/S .....                                                   | 62 |
| TABULKA 5: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL A PŘETVÁŘENÝ S RYCHLOSTMI V CM/S. ....                                    | 71 |
| TABULKA 6: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL E PŘETVÁŘENÝ S RYCHLOSTMI V CM/S. ....                                    | 71 |
| TABULKA 7: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL B PŘETVÁŘENÝ S RYCHLOSTMI V CM/S. ....                                    | 72 |
| TABULKA 8: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL C PŘETVÁŘENÝ S RYCHLOSTMI V CM/S. ....                                    | 72 |
| TABULKA 9: MODELOVANÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL D PŘETVÁŘENÝ S RYCHLOSTMI V CM/S. ....                                    | 73 |
| TABULKA 10: POROVNÁNÍ PROFILŮ NAMĚŘENÝCH (TABULKA VLEVO) A MODELOVANÝCH(TABULKA VPRAVO)<br>RYCHLOSTÍ V CM/S. .... | 73 |
| TABULKA 11: HODNOTY ABSOLUTNÍCH ROZDÍLŮ NAMĚŘENÝCH A MODELOVANÝCH RYCHLOSTÍ V CM/S. ....                          | 73 |
| TABULKA 12: POROVNÁNÍ PROFILŮ NAMĚŘENÝCH (TABULKA VLEVO) A MODELOVANÝCH(TABULKA VPRAVO)<br>RYCHLOSTÍ V CM/S. .... | 74 |
| TABULKA 13: HODNOTY ABSOLUTNÍCH ROZDÍLŮ NAMĚŘENÝCH A MODELOVANÝCH RYCHLOSTÍ V CM/S. ....                          | 74 |
| TABULKA 14: POROVNÁNÍ PROFILŮ NAMĚŘENÝCH (TABULKA VLEVO) A MODELOVANÝCH(TABULKA VPRAVO)<br>RYCHLOSTÍ V CM/S. .... | 74 |
| TABULKA 15: HODNOTY ABSOLUTNÍCH ROZDÍLŮ NAMĚŘENÝCH A MODELOVANÝCH RYCHLOSTÍ V CM/S. ....                          | 74 |
| TABULKA 16 POROVNÁNÍ PROFILŮ NAMĚŘENÝCH (TABULKA VLEVO) A MODELOVANÝCH(TABULKA VPRAVO)<br>RYCHLOSTÍ V CM/S. ....  | 74 |
| TABULKA 17: HODNOTY ABSOLUTNÍCH ROZDÍLŮ NAMĚŘENÝCH A MODELOVANÝCH RYCHLOSTÍ V CM/S. ....                          | 74 |
| TABULKA 18: POROVNÁNÍ PROFILŮ NAMĚŘENÝCH (TABULKA VLEVO) A MODELOVANÝCH(TABULKA VPRAVO)<br>RYCHLOSTÍ V CM/S. .... | 51 |
| TABULKA 19: HODNOTY ABSOLUTNÍCH ROZDÍLŮ NAMĚŘENÝCH A MODELOVANÝCH RYCHLOSTÍ V CM/S. ....                          | 51 |



## SEZNAM ROVNIC

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| ROVNICE 1: ABSOLUTNÍ KVALITATIVNÍ VÝMĚN.....                               | 16 |
| ROVNICE 2: RELATIVNÍ STUPEŇ VÝMĚNY .....                                   | 16 |
| ROVNICE 3: PŘETVÁŘENÝ VÝRAZ LÁTKOVÉ BILANCI .....                          | 16 |
| ROVNICE 4: OBECNÉ VYJÁDŘENÍ RELATIVNÍHO STUPNĚ VÝMĚNY VODY V BAZÉNU“ ..... | 16 |
| ROVNICE 5: VÝRAZ DOKONALÉ VÝMĚNY .....                                     | 18 |
| ROVNICE 6: FUNKCE VYJÁDŘENÍ DOKONALÉHO SMĚŠOVÁNÍ.....                      | 19 |
| ROVNICE 7: FUNKCE CHARAKTERISTIKY NEDOKONALÉHO SMĚŠOVÁNÍ.....              | 21 |
| ROVNICE 8: MEZNÍ VYJÁDŘENÍ KVALITY VODY PŘI „REÁLNÉ VÝMĚNĚ“ VODY .....     | 22 |
| ROVNICE 9: FUNKCE CHARAKTERISTIKY NEDOKONALÉHO SMĚŠOVÁNÍ.....              | 22 |
| ROVNICE 10: BILANČNÍ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE .....                           | 24 |
| ROVNICE 11: DIFERENCIÁLNÍ TVAR ROVNICE KONEČNÝCH ROZDÍLŮ .....             | 48 |
| ROVNICE 12: ROVNICE KONEČNÝCH OBJEMŮ .....                                 | 48 |
| ROVNICE 13: ROVNICE KONEČNÝCH PRVKŮ .....                                  | 50 |
| ROVNICE 14: ROVNICE TURBULENTNÍ VIZKOZITY .....                            | 50 |
| ROVNICE 15: AFINITNÍ ZÁKON .....                                           | 62 |

## PŘÍLOHY

### FOTODOKUMENTACE



Obr. 1 : Pohled na bazén ve společnosti Vágnerpool, kde probíhalo měření rychlostí.



Obr. 2 : Pohled na bazén ve společnosti Vágnerpool, kde probíhalo měření rychlostí.



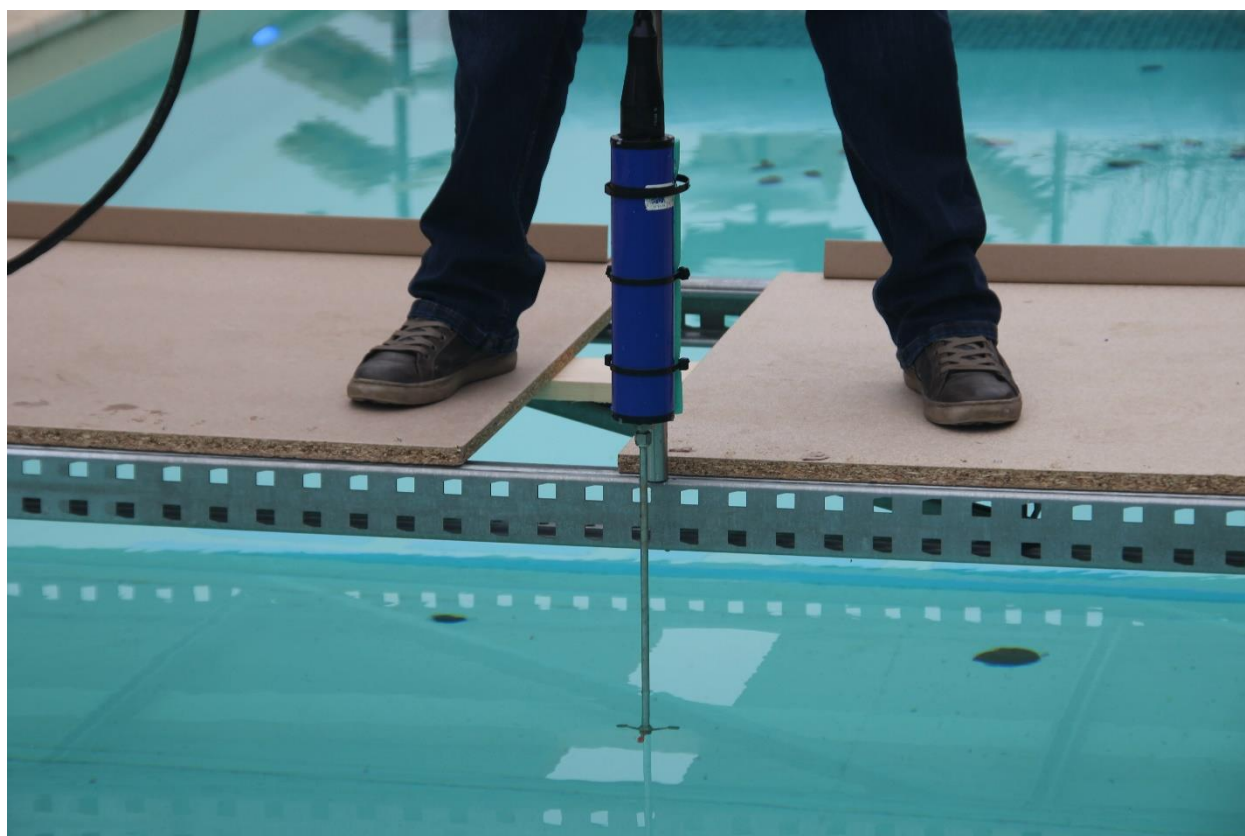
Obr. 3 : Pohled na lávku sloužící k měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 4 : Detail při měření rozměrů bazénu ve společnosti Vágnerpool, kde probíhalo měření rychlostí.



Obr. 5 : Pohled na měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



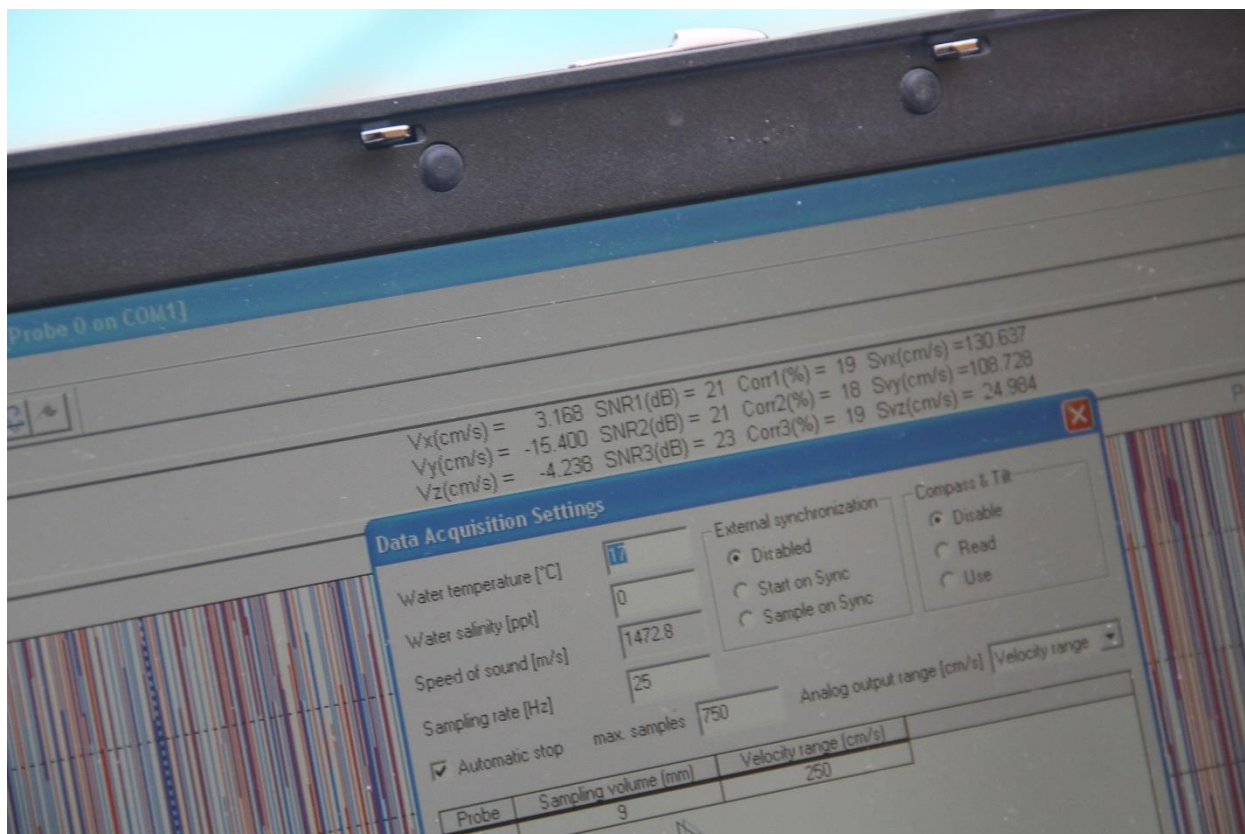
Obr. 7 : Detailní pohled na měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 8 : Pohled na hlavní měřicí stanoviště při měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 9 : Detailní pohled na výpočetní techniku na hlavním měřicím stanovišti při měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 10 : Detailní pohled na výpočetní program při měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 11 : Pohled na recirkulační úpravnu bazénu při měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 12 : Detailní pohled na recirkulační čerpadlo při měření rychlostí na bazénu ve společnosti Vágnerpool.



Obr. 13 : Detailní pohled na měření a regulaci na bazénu ve společnosti Vágnerpool.

## DOSLOV

Na závěr bych chtěl poděkovat společnosti VAGNERpool a doc. Ing. Bohumilu Šťastnému, Ph.D. za poskytnutí bazénu prototypu a potřebných k měření pomůcek.