

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ**

Studentská vědecká odborná činnost
Akademický rok 2011/2012

**MODELOVÁNÍ POHYBU SPLAVENIN
POMOCÍ PROGRAMU CFX**

SEDIMENT TRANSPORT MODELING USING CFX

Jméno a příjmení studenta:

Eva Škařupová

Studijní obor:

Vodní hospodářství a vodní stavby

Ročník:

1. ročník magisterského studia

Vedoucí práce:

Dr. Ing. Petr Nowak

Obsah

Abstrakt	3
Abstract	3
1 Úvod	4
2 Návrh lapáku písku	4
3 Matematické modely a jejich využití	5
3.1 Nepřesnosti řešení matematickými modely	5
3.2 Numerické řešení	6
3.3 Multiphase Model	8
3.4 Particle Tracking Model	10
4 Modelování v programu CFX	11
4.1 Geometrie modelu a výpočtová síť	12
4.2 Jednofázové proudění vody	13
4.2.1 Nastavení výpočtu	13
4.2.2 Průběh výpočtu a konvergence	14
4.2.3 Výsledky a jejich zhodnocení	14
4.3 Dvofázové proudění – Multiphase model	15
4.3.1 Nastavení výpočtu	15
4.3.2 Průběh výpočtu a konvergence	17
4.3.3 Výsledky a jejich zhodnocení	17
4.4 Dvofázové proudění – Particle tracking	18
4.4.1 Nastavení výpočtu	18
4.4.2 Průběh výpočtu a konvergence	20
4.4.3 Výsledky a jejich zhodnocení	20
5 Závěr	21
Literatura	22
Přílohy	23

Abstrakt

Cílem této práce je ověřit možnost modelování pohybu částic lapákem písku pomocí matematického modelu vytvořeného v programu ANSYS-CFX. Práce se zabývá hledáním vhodného nastavení matematického modelu popisujícího pohyb splavenin lapákem (v programu ANSYS-CFX) při využití obou základní přístupů k modelování vícefázového proudění - "Eulerian-Eulerian Model" a "Lagrangian Particle Tracking model". Výstupy matematického modelu byly ověřeny porovnáním s klasickými návrhovými postupy. Model bude kalibrován podle fyzikálního modelu sestaveného ve vodohospodářské laboratoři.

Abstract

Aim of this work was to check up the possibility of computational modeling of particle motion through the sand trap (ANSYS – CFX). Using both methods of multiphase flow modeling available in CFX - "Eulerian-Eulerian Model" and "Lagrangian Particle Tracking Model", we were trying to find accurate settings of the model. Results obtained from mathematical model are compared with standard methods used for design of sand traps. Model will be calibrated according to results we will get from physical model.

1 Úvod

Spolu s bouřlivým vývojem výpočetní techniky došlo i k rozvoji numerických metod řešení fyzikálních problémů. Tak vznikl nový obor, nazývaný Computational Fluid Dynamics (CFD), zabývající se výpočtem proudění (a s ním spojených jevů) pomocí matematických modelů. Ty jsou v porovnání s fyzikálními modely rychlejší a především levnější. Navíc se dá očekávat, že spolu s vývojem výpočetní techniky, se budou možnosti matematického modelování rozšiřovat. Je však třeba najít a ověřit vhodná nastavení matematických modelů pro jednotlivé hydrotechnické problémy tak, aby co nejvíce odpovídaly realitě.

Cílem této práce je ověřit možnost modelování pohybu částic lapákem písku. Lapák písku, který je umístován před vtok do vodní elektrárny, zachytává zrnka štěrku a různých frakcí písku nesených vodním proudem. Tím je zabráněno jejich působení na soustrojí elektrárny. Vhodným návrhem lapáku dochází k prodloužení životnosti soustrojí a tím ke zlepšení návratnosti investic do vodní energie. Díky přesným modelům by bylo možné optimalizovat rozměry lapáku v návaznosti na jeho účinnost a především předejít hrubým chybám v případě atypických návrhů.

V této práci se budeme zabývat hledáním vhodného nastavení matematického modelu popisujícího pohyb splavenin lapákem (v programu ANSYS-CFX). Výstupy matematického modelu byly ověřeny porovnáním s klasickými návrhovými postupy.

Budeme se zabývat transportem splavenin a jejich sedimentací v lapáku písku. Jedná se o proudění s volnou hladinou, ve kterém se kromě vody vyskytují pevné částice. Program CFX nabízí dva základní přístupy k modelování vícefázového proudění - "Eulerian-Eulerian Model", a "Lagrangian Particle Tracking model". V následujících kapitolách se budeme zabývat základními vlastnostmi těchto modelů, jejich výhodami a nevýhodami. Cílem je zvolit vhodný přístup, který bude co nejlépe simulovat zadanou situaci a poskytne nám požadované výstupy.

2 Návrh lapáku písku

Funkce lapáku písku je založena na jednoduchých fyzikálních principech. Tak jak voda lapákem protéká a zvětšuje se průtočný profil, průtočná rychlost klesne natolik, že suspendovaný materiál již nemůže být dále držen ve vznosu a začne klesat ke dnu.

Aby se usazené částice nedostávaly znovu do vznosu, je třeba zajistit, aby průtočná rychlost v lapáku nepřesáhla tzv. rychlost kritickou. Kritickou rychlost pro částici o konkrétním průměru můžeme určit z Campova vztahu

$$v = a \sqrt{d} \text{ [cm/sec]}$$

kde d je průměr částice v mm a a je konstanta

$$a = 36 \quad \text{pro } d > 1 \text{ mm}$$

$$a = 44 \quad \text{pro } 1 \text{ mm} > d > 0.1 \text{ mm}$$

$$a = 51 \quad \text{pro } 0.1 \text{ mm} > d$$

Suspendovaná částice je unášena vodním proudem rychlostí v_d (průtočná rychlost) a současně klesá ke dnu sedimentační rychlostí v_s . Tu můžeme definovat jako rychlost klesání částice ve stojaté vodě v_s zmenšenou o působení turbulencí $w=a*v_d$, které klesání zpomalují. Působení turbulencí je tím větší, čím větší je průtočná rychlost. Podle Vischera a Hubera [11]:

$$v_s' = v_s - a v_d \quad \text{kde } a = 0.04$$

$$v_s' = v_s - 0.04 * v_d \quad [m/s]$$

Sedimentační rychlost částice ve stojaté vodě je možné vyčíst z mnoha diagramů dostupných v odborné literatuře. Je nutno podotknout, že rychlost klesání je závislá na několika faktorech. Především je to tvar částic, jejich koncentrace a v neposlední řadě teplota okolní vody, na které závisí její viskozita.

3 Matematické modely a jejich využití

Matematické modelování je úzce spojeno s vývojem výpočetní techniky. Se zvyšujícími se výpočetními kapacitami je možné modely zpřesňovat, aplikovat je na větší oblasti a především zlevňovat. Většina problémů, které je dnes možné simulovat na matematickém modelu, bylo v minulosti možno řešit pouze modelem fyzikálním. Právě časová i finanční nákladnost fyzikálních modelů je motivací pro rozvoj matematického modelování. Je však třeba ještě dlouhého vývoje, než bude moci experimenty na fyzikálních modelech plně nahradit.

3.1 Nepřesnosti řešení matematickými modely

Je třeba si uvědomit, že všechna řešení získaná numerickými metodami jsou pouze více či méně přesnou aproximací skutečného stavu. Proudění a s ním spojené jevy popisujeme parciálními diferenciálními rovnicemi, které až na speciální případy nemohou být řešeny analytickým způsobem. Abychom byli schopni numericky aproximovat řešení, je třeba použít "diskretizační metody". Ta nahrazuje diferenciální rovnice systémem rovnic algebraických, které je možné řešit pomocí počítače. Aproximace je prováděna po malých krocích v prostoru i čase, čímž získáváme diskrétní řešení pro jednotlivé body a čas t . Stejně tak jako je přesnost experimentálního řešení závislá na kvalitě použitých nástrojů, je přesnost numerického řešení závislá na kvalitě diskretizace.

Při získávání řešení se v každém kroku dopouštíme určité chyby:

- diferenciální rovnice popisující zkoumaný jev mohou brát v úvahu určitá zjednodušení
- podstatou diskretizačního procesu je aproximace
- pro řešení je obvykle využívána iterativní metoda, jejíž přesnost závisí na počtu provedených iterací a tím na výpočetním čas

V případě, že jsou řídicí rovnice přesně známy (např. Navier-Stokesovi rovnice pro nestlačitelné Newtonské proudění), může být teoreticky dosaženo výsledku o libovolné přesnosti. Avšak mnoho fyzikálních jevů a procesů (např. turbulence, spalování, vícefázové proudění) není popsáno přesnými rovnicemi nebo není jejich numerické řešení proveditelné. Tím vzniká potřeba zapojit do výpočtu různé modely, čímž se do řešení vnáší další chyby. Z těchto důvodů nemusí dosažené řešení odpovídat realitě. Je nutné s pomocí experimentálně získaných dat výsledky matematického modelu ověřit (provést verifikaci modelu) [10].

3.2 Numerické řešení

V první řadě je nutno vysvětlit některé pojmy a alespoň nastínit postup výpočtu. [2], [7], [9]

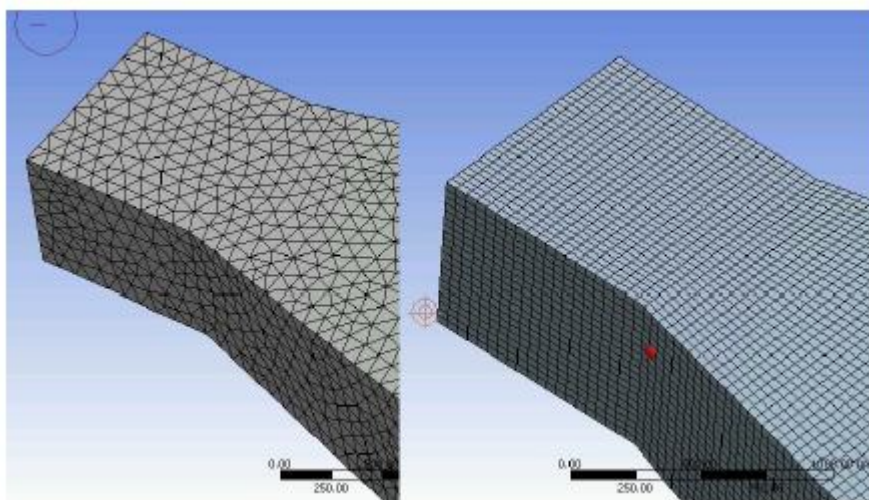
Matematický model je základním prvkem numerického řešení. Jedná se o soustavu diferenciálních a integrálně-diferenciálních rovnic a okrajových podmínek. Do tohoto modelu můžeme oproti reálným fyzikálním vztahům vnášet jistá zjednodušení. Je však třeba posoudit, jaký vliv budou tato zjednodušení mít na získané výsledky.

Diskretizační metoda je způsob, jakým diferenciální rovnice matematického modelu převedeme na systém algebraických rovnic pro konkrétní proměnné v jednotlivých místech a čase. Existuje mnoho způsobů diskretizace. Nejpoužívanějšími a současně nejuniverzálnějšími jsou metoda konečných rozdílů (FDM - finite difference method), metoda konečných objemů (FVM - finite volume method) a metoda konečných prvků (FEM - finite element method).

Metoda konečných objemů - FVM je pravděpodobně nejjednodušší na pochopení i programování. Je možné ji aplikovat na jakoukoli výpočtovou síť (je vhodná i pro složité geometrie) a není nutné ji vztahovat k souřadnému systému. Oblast řešení je rozdělena na konečný počet na sebe navazujících podoblastí, tedy kontrolních objemů. V těžišti každé buňky resp. na jejím povrchu (podle konkrétního řešiče) leží tzv. výpočtový uzel, v němž jsou vyčíslovány hodnoty jednotlivých proměnných. Pro určení hodnot v mezilehlých oblastech se využívá interpolace hodnot z výpočtových uzlů v okolí.

Souřadný systém ovlivňuje způsob zápisu řídicích rovnic. S ohledem na vlastnosti popisovaného proudění, můžeme zvolit různé souřadné systémy, což dále ovlivňuje i proces diskretizace a tvorbu výpočtové sítě. Za zmínku stojí, že souřadný systém může být i pohyblivý. V této práci však budeme využívat pouze kartézský souřadný systém s pevně daným počátkem.

Výpočtová síť definuje jednotlivé body, ve kterých je řešen systém algebraických rovnic. Síť rozděluje oblast, na kterou chceme matematický model aplikovat, na konečný počet podoblastí (prvky, kontrolní objemy apod.). Dříve byla využívána především takzvaná "strukturovaná síť", tedy síť jejíž elementy mají tvar čtyřúhelníků ve dvourozměrném případě a tvar šestištěnů v případě třírozměrném. V dnešní době se začíná přecházet k síti "nestrukturované", tvořené kvádry, prizmatickými a pyramidovými prvky a čtyřštěny. Obě jmenované možnosti je možno kombinovat. (viz. obrázek č. 1 – vlevo nestrukturovaná, vpravo strukturovaná síť).



Obr. 1: Strukturovaná a nestrukturovaná výpočtová síť

CFX je nástrojem pro simulaci širokého spektra procesů a jevů souvisejících s prouděním tekutin. Byl a je používán v mnoha oblastech průmyslu (automobilní inženýrství, letectví, stavební průmysl, chemický průmysl, elektronika, lodní průmysl, atd.) a od roku 2003 je součástí komerčního balíku výpočtových programů ANSYS.

Tvorba výpočtové sítě je důležitou součástí matematického modelování. Z popsaného způsobu diskretizace diferenciálních rovnic vyplývá, že od kvality (hustoty) výpočtové sítě se odvíjí nejen přesnost výpočtu, ale také jeho výpočtová náročnost. Vzhledem k tomu, že v dnešní době je hlavním limitujícím faktorem pro využívání matematických modelů právě výkon výpočetní techniky, je nutné přípravě sítě věnovat dostatečnou pozornost. Naším cílem bude redukovat počet výpočtových buněk na nutné minimum. Elementy by však měly mít velikost přiměřenou modelovanému jevu. Abychom dosáhli kompromisu zajišťujícího odpovídající přesnost výsledku a současně akceptovatelný výpočetní čas, je možné použít místní zhuštění sítě. Toho využijeme především v místech, kde dochází k rychlé změně určených veličin, nebo v místech pro výpočet stěžejních (např. mezní vrstva u stěny modelu). [9] [1]

Konvergence výpočtu - Řešení získaného systému algebraických rovnic probíhá iterační metodou. Opakovanými výpočty se zjištěné hodnoty veličin přibližují, konvergují, k reálným hodnotám. Veličinou, na základě které můžeme hodnotit míru konvergence výpočtu, je residuum R . Residuum představuje rozdíl dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích. Měřítkem pro zhodnocení míry konvergence je potom součet residuí ve všech výpočtových buňkách geometrie v daném časovém kroku. [10]

Velikost residuí R se vztahuje k hodnotám vyšetřované veličiny. Proto se residua pro různé veličiny (například pro tlak a rychlost) mohou řádově lišit. Z tohoto důvodu zavádíme takzvané normalizované residuum R_n , které získáme podílem hodnoty R a hodnoty zkoumané veličiny.

Residua jsou vyšetřována pro všechny zkoumané veličiny v každém kroku výpočtu. Jejich grafické zobrazení slouží k průběžné kontrole konvergence výpočtu. Pro naše výpočty budeme uvažovat, že pokud suma residuí u zkoumaných veličin klesne pod hodnotu 10^{-3} je konvergence výpočtu dostatečná.

Konvergenci je možno urychlit vhodným počátečním odhadem některé ze základních veličin. Nejlepším způsobem jak dosáhnout přesného odhadu je řešení problému po jednotlivých částech. Výpočet provedeme pro nejjednodušší možnou situaci, která se poté stane výchozím stavem pro situaci složitější. Tímto způsobem je možné výpočty řetězit a dosáhnout tak přesnějších výsledků za kratší výpočtový čas.

Volba matematického modelu - abychom mohli přistoupit k samotnému řešení, je nutné v první řadě obecně popsat fyzikální problém, který chceme řešit a zvolit vhodný matematický model (systém řídicích rovnic). Cílem naší práce je numerickým modelem řešit transport splavenin a jejich sedimentaci v lapáku písku. Jedná se tedy o proudění s volnou hladinou, ve kterém se kromě vody vyskytují pevné částice.

Pokud jsou v systému přítomny dvě nebo více látek, které nejsou promíseny na molekulární úrovni a existuje mezi nimi jasně odlišitelná hranice (např. bublinky vzduchu ve vodě), mluvíme o takzvaném vícefázovém proudění.

Pozn.: Je třeba rozlišovat proudění vícefázové od proudění směsi látek. V případě směsi jsou všechny přítomné kapaliny promíseny na molekulární úrovni. Sdílejí tedy rychlostní pole a mají shodnou teplotu. Jako typický příklad můžeme uvést například roztoky rozpustných látek.

Program CFX nabízí dva základní přístupy k modelování vícefázového proudění - "Eulerian-Eulerian Model", a "Lagrangian Particle Tracking model". V následujících podkapitolách se budeme zabývat základními vlastnostmi těchto modelů, jejich výhodami a nevýhodami. Cílem je zvolit vhodný přístup, který bude co nejlépe simulovat zadanou situaci a poskytne nám požadované výstupy. Vzhledem k tomu, že naším záměrem je simulovat především pohyb splavenin ve vodě, přistoupili jsme ke zjednodušujícímu předpokladu, že hladina v lapáku písku je vodorovná (bude podrobněji popsáno v kapitole č.4.2) Tím se třífázové proudění (vzduch, voda, pevné částice) redukuje na proudění dvoufázové (voda, pevné částice). Dojde ke zjednodušení výpočtu a současně ke zmenšení výpočtové oblasti, čímž se sníží nároky na výpočtový čas. [3]

Z výše uvedených důvodů se budeme nadále zabývat pouze prouděním dvoufázovým. Zobecněním uváděných vztahů, lze dospět k rovnicím popisujícím libovolný počet fází.

3.3 Multiphase Model

Tento model předpokládá, že jednotlivé fáze nacházející se v systému jsou mezi sebou tak dobře promíchány, že je můžeme považovat za prolínající se kontinua. Pro obě prolínající se fáze jsou řídicími rovnicemi Eulerovy rovnice proudění. Proto je také nazýván jako "Eulerian-Eulerian" model. Uvažujme tedy proudění fází α a β . Elementárním výpočtovým objemem V je v našem případě jedna výpočtová buňka. Objemový podíl r_α v objemu V vypočítáme jako

$$r_\alpha = \frac{V_\alpha}{V}$$

Základním předpokladem dvoufázového proudění je, že součet objemových podílů jednotlivých látek r_α a r_β je v každém výpočtovém objemu V systému roven jedné.

$$r_\alpha + r_\beta = 1$$

CFX nabízí dvě větve modelu "Eulerian-Eulerian". Můžeme volit mezi modelem homogenním a nehomogenním.

Homogenní model je speciálním případem, kdy všechny fáze sdílí společné proudové pole, stejně tak jako další důležité vlastnosti (teplota, turbulence apod.). Pro výpočet našeho problému je tento model nevhodný. Aby byla umožněna separace splavenin, je nutno odlišit rychlostní pole vody a pevných částic.

Jinak je tomu v případě **nehomogenního modelu**. V tomto případě má každá fáze vlastní proudové pole a výpočet probíhá pro každou fázi zvlášť. Dochází mezi nimi k výměně tepla a hybnosti a systém se snaží dostat do rovnovážného stavu.

V našem případě můžeme dojít hned k několika zjednodušením všeobecných rovnic. Prvním zjednodušením je zanedbání tepelné výměny mezi fázemi a mezi systémem a okolním prostředím. Předpokládáme, že před začátkem pokusu proudila voda systémem již dostatečně dlouho na to, aby se teploty vyrovnaly. Také není nutné uvažovat vzájemnou chemickou reakci fází. K dalšímu zjednodušení dojdeme, pokud budeme kontinuální vodu považovat za nestlačitelnou.

Vzhledem k tomu, že se jedná o pomalu proudící Newtonskou kapalinu (vodu) za atmosférického nebo jen mírně vyššího tlaku, považujeme tento předpoklad za správný. Základními řídicími rovnicemi pro výpočet spojitě fáze tedy bude zjednodušená rovnice spojitosti

$$\begin{aligned} \rho \frac{\delta u_x}{\delta x} + \rho \frac{\delta u_y}{\delta y} + \rho \frac{\delta u_z}{\delta z} + \frac{\delta \rho}{\delta t} &= 0 \\ \text{pro } \rho = \text{konst} \quad \frac{\delta \rho}{\delta t} &= 0 \\ \frac{\delta u_x}{\delta x} + \frac{\delta u_y}{\delta y} + \frac{\delta u_z}{\delta z} &= 0 \end{aligned}$$

a rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti:

$$\frac{\delta u_x}{\delta t} + u_x \frac{\delta u_x}{\delta x} + u_y \frac{\delta u_y}{\delta y} + u_z \frac{\delta u_z}{\delta z} = -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x}\right) + \nu \frac{\delta^2 u_x}{\delta x^2} + \nu \frac{\delta^2 u_y}{\delta y^2} + \nu \frac{\delta^2 u_z}{\delta z^2} + g_i$$

Podle morfologie jednotlivých fází rozlišuje tři typy nehomogenního modelu

- **"The Particle model"** používáme v případě, že jedna fáze proudění je rozptýlena ve formě kulových částic ve fázi druhé - kontinuální. Tento model je vhodný pro simulaci např. plyných bublinek v kapalině, dvou nemísitelných kapalin či pevných částic rozptýlených v tekutině nebo plynu.
- **"The Mixture model"** je jednoduchým model, který považuje obě fáze za kontinuální. Nejčastěji se používá k získání prvotní aproximace.
- **"Free Surface model"** dovoluje simulaci proudění s volnou hladinou tj. proudění dvou kontinuálních fází s jasně rozlišenou vzájemnou hranicí.

[3], [4], [1], [5], [6]

3.4 Particle Tracking Model

Jak je patrné již z názvu modelu, jeho podstatou je výpočet jednotlivých trajektorií částic. Particle Tracking Model počítá pohyb jednotlivých fází odděleně. V prvním kroku výpočtu je za pomoci Eulerových rovnic (stejně jako v Eulerian-Eulerian model) určeno proudové pole kontinuální fáze. Díky tomu je možné použít obdobných zjednodušujících předpokladů jako ve výše popsaném Multiphase modelu (kapitola 3.3). Na základě proudového pole kontinuální fáze je poté určován pohyb fáze rozptýlené - disperzní. Ta je reprezentována několika samostatnými částicemi, jejichž pohyb se řídí Lagrangovými rovnicemi. Z tohoto důvodu je model také nazýván "Eulerian-Lagrangian Model". Spojitá fáze vždy na částice působí, a to silou unášecí, vztlakovou a podle konkrétního fyzikálního modelu příp. i silami dalšími. Naopak částice kontinuální fázi ovlivňovat mohou a nemusí. Obzvláště pro případy s nízkým obsahem rozptýlených částic je z důvodu výpočtové náročnosti výhodné ovlivnění kontinuální fáze částicemi zanedbat.

Jak již bylo nastíněno výše, Eulerian-Lagrangian model, neuvažuje plný objem disperzní fáze, ale nahrazuje ho několika vzorovými částicemi, z nichž každá část celkového objemu reprezentuje. Trajektorie částice pohybující se skrz kontinuální fázi je výsledkem započítání sil na ni působících. Ve směru x tedy platí:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D (u - u_P) + g_x \frac{(\rho_P - \rho)}{\rho} + F_x$$

kde u = rychlost spojitě fáze, u_P = rychlost částice, D_P = průměr částice, ρ_P = hustota částice, $F_D (u - u_P)$ = unášecí síla na jednotku objemu částic vyjádřena jako:

$$F_D = \frac{18 \mu}{\rho_P D_P^2} \frac{C_D Re_p}{24}$$

μ = dynamická viskozita vody a C_D = unášecí koeficient obvykle vyjádřený jako funkce Reynoldsova čísla částice Re_p , přičemž

$$Re_p = \frac{\rho D_P |u_P - u|}{\mu}$$

Unášecí koeficient C_D závisí na režimu proudění, potažmo na Reynoldsově čísle částice. Pro vysoká Reynoldsova čísla ($Re_p > 1000$) je unášecí koeficient konstantou $C_D = 0.4$. Naopak pro nízká $Re_p (< 0.1)$ platí

$$C_D = \frac{24}{Re_p}$$

V mezilehlé oblasti je vztah mezi unášecím koeficientem C_D a Reynoldsovým číslem částic složitější. Obecně se dá vyjádřit vztahem

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{R} + \frac{a_3}{R^2}$$

Hodnoty a_1 až a_3 jsou závislé na tvaru konkrétní částice a je možné je určit měřením.

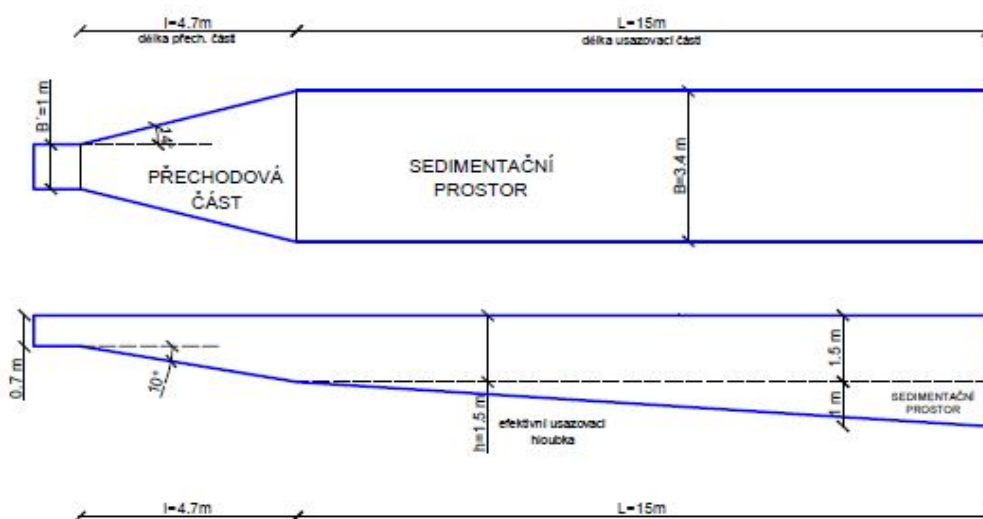
Je třeba zdůraznit, že výpočet trajektorie probíhá pro každou částici zvlášť. Z toho plyne největší omezení tohoto modelu - není schopen brát v úvahu interakci s ostatními částicemi. Particle-Tracking model tedy není možné použít pro situace s vysokou koncentrací částic.

[3], [4], [6], [1], [5]

4 Modelování v programu CFX

K řešení problému jsme přistoupili metodou "step by step", tedy krok za krokem od nejjednoduššího ke složitějšímu. V prvním kroku byla ověřena hydraulická vhodnost navrženého lapáku písku (návrh viz. kapitola č.2). Byl proveden výpočet proudění vody – jednofázový model za předpokladu ustáleného proudění. Jeho výstupy byly použity jako počáteční podmínka pro následné výpočty vícefázového proudění.

Na základě návrhu lapáku písku, který je uveden v kapitole č.2, byl vytvořen zjednodušený 3D model. Nepřesnosti při zadávání okrajových podmínek, především na vstupu a výstupu z modelu, vedou ke zkreslení výpočtu v krajních oblastech modelu. V našem případě okrajová podmínka na vstupu předpokládá homogenní rychlostní pole v celém průtočném profilu, což není přesné. Z tohoto důvodu byl před samotný lapák písku umístěn ještě 1 m přívodního kanálu. Tím se okrajová podmínka vzdálila od zkoumaného prostoru. V oblasti přívodního kanálu se rychlost proudění rozvrství a hodnoty proměnných na vstupu do lapáku se přiblíží realitě. Z trajektorií částic v tomto úseku navíc můžeme alespoň odhadovat jejich chování v příváděcím kanále. Přesnější určení rizika zanášení kanálu sedimentujícími splaveninami by vyžadovalo informace o konstrukci příváděcího kanálu není předmětem této práce.



Obr. 2: Návrh lapáku písku

Pro modelování byl zvolen případ, kdy je sedimentační prostor zaplněn a proudění tedy prochází průtočnou plochou $S=B \cdot h$. V případě, pokud by sedimentační prostor nebyl zcela zaplněn, dojde ke zvětšení průtočné plochy a tím ke snížení průtočné rychlosti, čímž se účinnost lapáku zvyšuje. Modelovaný případ je tedy nejméně příznivý.

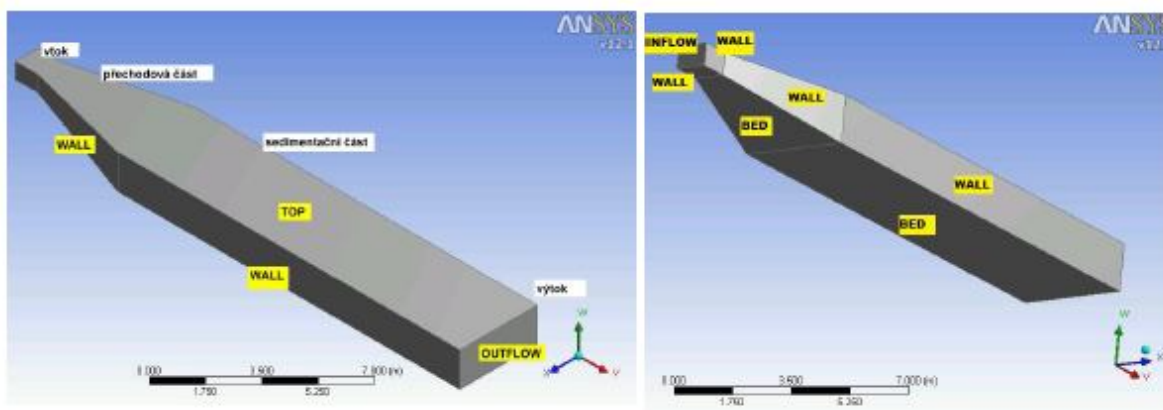
Abychom dosáhli zkrácení výpočtového času, zvolili jsme zjednodušenou geometrii na výstupu z lapáku. Přepad jsme nahradili výtokem v celém profilu. Přepad je složitým dějem, jehož modelování je časově náročné. Vzhledem k malým rychlostem proudění můžeme předpokládat, že se vliv tohoto zjednodušení nebude propagovat daleko před výtok ze systému.

Výpočet transportu částic je výrazně náročnější, než výpočet samotného proudění. Z tohoto důvodu byl jednofázový model proudění vody využit také k optimalizaci výpočtové sítě, časového kroku, počátečních podmínek a míry

konvergence. Vzhledem k rozsahu této práce nebylo možné tuto optimalizaci podrobně provést i pro vícefázové modely. Díky nízké koncentraci pevných částic rozptýlených ve vodě (objemová koncentrace odpovídala 1%) však můžeme předpokládat, že vhodné nastavení jedno a vícefázového modelu je obdobné.

4.1 Geometrie modelu a výpočtová síť

3D model byl vytvořen podle schématu na obrázku č.2, tedy v měřítku 1:1. Jednotlivé stěny modelu byly rozděleny do pěti skupin (viz. obrázek č.3). Každé skupině (obsahující jednu nebo více ploch) pak byly v průběhu výpočtů přiřazeny určité vlastnosti tzv. okrajové podmínky. Rozdělení skupin zůstává pro všechny výpočty stejné, mění se pouze nastavení okrajových podmínek.



Obr. 3: Umístění okrajových podmínek

- **inflow** plocha, kterou voda vstupuje do modelu
- **outflow** plocha, kterou voda vystupuje z modelu
- **wall** betonová stěna
- **bed** plocha na které se očekává sedimentace částic
- **top** předpokládaná hladina

Pro navrženou geometrii byla vytvořena strukturovaná výpočetní síť složená z šestistěnnů (720 000 buněk) a nestruturovaná výpočetní síť složená ze čtyřstěnnů (276 000 buněk). Obě sítě mají přibližně stejnou hustotu (počet buněk se liší kvůli různým tvarům elementárních objemů). Na obou typech byl spuštěn výpočet jednofázového proudění s naprosto shodným nastavením modelu. Samotným nastavením se budeme zabývat níže (kapitola 5.2). Po jednom tisíci iterací byly výpočty zastaveny a porovnána míra jejich konvergence. Výsledky jsou znázorněny na obrázku v příloze obrázek 6.1.

Shodný výpočtový čas (náročnost) obou modelů nám dovoluje dobré porovnání. Rozhodujícími kritérii byl pokles relativních residuí tlaku a složek rychlosti u, v, w (podle souřadného systému x, y, z) a snižující se nerovnováha mezi přítokem a odtokem. Z obrázku 6.1 je patrné, že oba výpočty jsou stabilní a konvergují bez větších problémů. Avšak strukturovaná výpočtová síť lépe splnila obě výše uvedené podmínky a proto byla použita pro další výpočty.

4.2 Jednofázové proudění vody

Nyní se budeme věnovat jednofázovému modelu proudění vody. Cílem tohoto výpočtu je posoudit hydraulickou vhodnost provedeného návrhu lapáku a také získat dostatečně přesné počáteční podmínky pro další výpočty.

4.2.1 Nastavení výpočtu

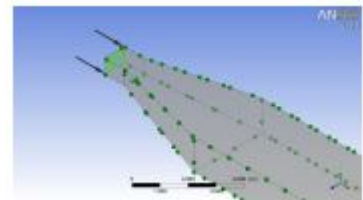
Výpočet byl proveden na strukturované síti s časovým krokem 0.001 s. Jako počáteční podmínka byla zadána rychlost proudění v kartézských souřadnicích ($u=0.5$ m/s, $v=w=0$ m/s).

Vlastnosti domény, tedy výpočtové oblasti, jsou rozhodující pro zvolení matematického modelu (soustavy diferenciálních rovnic) použitého k řešení daného problému. Ve výčtu uvedme vlastnosti domény, ve které byl proveden náš výpočet

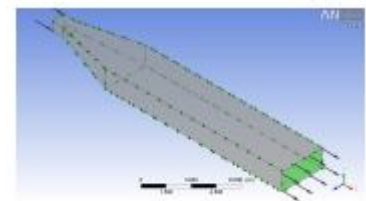
- **Souřadný systém** - nepohyblivý, kartézský
- **Přítomné fáze** - spojitě proudění vody (využívá přednastavených fyzikálních vlastností)
- **Gravitace** - pro jednofázové proudění se nezadává
- **Model turbulentního proudění** - "k- ϵ Model"
- **Přenos tepla, chemické reakce, tepelné záření** – neuvažujeme

Proudění bylo modelováno jako ustálené. Pojďme se nyní zaměřit na přesné vlastnosti proudění a nastavení okrajových podmínek modelu podle skupin, které byly uvedeny v kapitole 4.1.

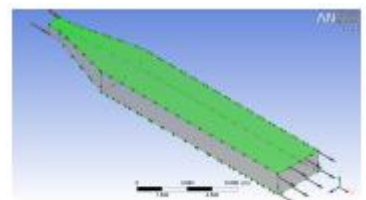
INFLOW - určuje vtok do systému. V nastavení tedy zadáváme podmínku *INLET* a definujeme ji přítokovou rychlostí. V našem případě je přítoková rychlost u kolmá na okrajovou podmínku a ve všech místech průtočného profilu konstantní. Lapák byl navržen na průtok $Q=1$ m³/s. Při průtočné ploše $S=0.7$ m² je vtoková rychlost rovna 1.43 m/s. Vzhledem k tomu, že nemáme bližší informace o charakteru proudění před vtokem do lapáku, je intenzita turbulencí na vtoku zadána obecně jako *střední*.



OUTFLOW - je podmínkou výtoku ze systému. Pokud je podmínka *INLET* definována normálovou rychlostí, nemůžeme stejné podmínky použít i na výtoku (předurčovali bychom výsledky). V tomto případě se obvykle používá podmínky tlaku. Tlak zadáváme v relativních hodnotách vůči předem zvolené hodnotě tzv. referenčnímu tlaku $P_{ref}=1$ atm. Pro náš výpočet byla použita podmínka *OUTLET*. Ta dovoluje pouze odtok z modelu, nikoliv vtok - tedy např. přísávání vzduchu do systému. Průměrného statického tlaku na průřezu (*Averaged Static Pressure*) $P_{av}=0$ Pa. Tyto podmínky simulují stav, kdy za profilem outflow proudění pokračuje za obdobných podmínek.

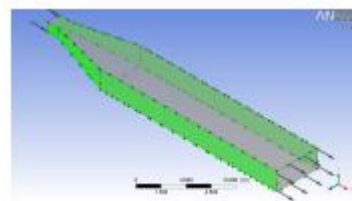


TOP - simuluje volnou hladinu. Vzhledem k malým rychlostem proudění v lapáku, můžeme považovat volnou hladinu za vodorovnou a nahradit ji okrajovou podmínkou

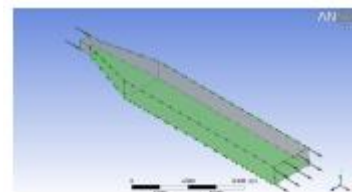


WALL. Tím dospějeme k zásadnímu zjednodušení při dalších výpočtech, kdy třífázové proudění nahradíme dvoufázovým. CFX dovoluje specifikovat vlastnosti podmínky jako takzvanou "Free Slip Wall", tedy stěnu, na které nedochází ke tření a tím pádem ani k ovlivnění rychlostního pole. Nastavením této podmínky zmírníme dopady použitého zjednodušení a dojde jen k minimálnímu ovlivnění proudového pole v systému.

WALL - je podmínkou definující chování proudění na styku se stěnou lapáku a v její blízkosti. Abychom simulovali ovlivnění rychlostního pole drsností stěny, byla zvolena podmínka "No Slip Wall". Ta zajišťuje, že se při stěnách modelu tvoří přechodová vrstva proudění tak jako ve skutečnosti. Přesný model přechodové vrstvy by vyžadoval velké zhuštění výpočtové sítě na styku se stěnou, což by vedlo k výraznému nárůstu náročnosti výpočtu. CFX obsahuje přednastavený model výpočtu proudění u stěny, který je ve většině případů (včetně našeho) vyhovující.



BED - okrajová podmínka, která získá význam až při modelování vícefázového proudění. V tuto chvíli je pouze stěnou modelu. Proto ji byly přiřazeny stejné vlastnosti jako ostatním stěnám - podmínka *WALL* s charakteristikou "No Slip Wall".

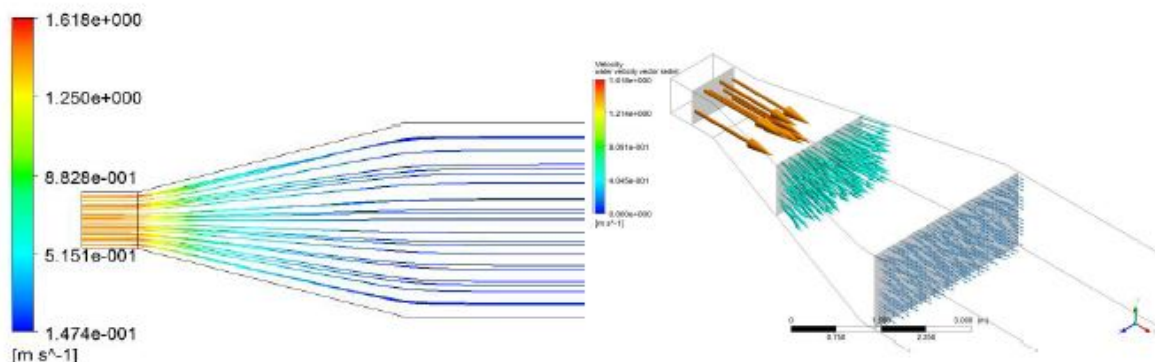


4.2.2 Průběh výpočtu a konvergence

Za požadovanou míru konvergence bylo zvoleno klesnutí všech sledovaných průměrných residuí pod hodnotu 10^{-3} . Aby bylo této hranice dosaženo, bylo potřeba 1352 iterací a celkový výpočetní čas 2 hodiny 59 minut. Z hodnot residuí a z nerovnováhy přítoku a odtoku můžeme pozorovat, že konvergence výpočtu byla plynulá a výpočtový čas přiměřený požadované přesnosti.

4.2.3 Výsledky a jejich zhodnocení

Pro námi sledované veličiny byly vytvořeny grafické výstupy (obrázky 6.2). Cílem tohoto výpočtu bylo mimo jiné ověřit hydraulický návrh lapáku písku provedený v kapitole č.2.



Obr. 4: Výstupy z jednofázového modelu

V levé části obrázku č.4 můžeme vidět průběh proudnic přechodovou částí lapáku. Vpravo jsou pak na třech příčných profilech (0.5m, 3m a 6m od počátku systému) vyneseny vektory rychlosti. Z obojího vyplývá, že přechod proudění z přívodního kanálu do rozšířené sedimentační části je plynulý. Pouze na rozhraní přívodního kanálu a přechodové části lapáku písku, tedy v místě změny směru proudění, můžeme pozorovat nepříliš výraznou kontrakci proudu. Postupným zvětšováním průtočné plochy dochází ke snižování rychlosti proudění pod hodnotu kritickou (určenou v kapitole č.2, $v_d=0.2 \text{ m/s}$). V sedimentačním prostoru se rychlosti proudění pohybují přibližně v rozmezí $0.17-0.19 \text{ m/s}$, což považujeme za vyhovující hodnoty.

Tímto výpočtem byla ověřena správnost hydraulického návrhu lapáku písku.

4.3 Dvofázové proudění – Multiphase model

Tento model předpokládá, že jednotlivé fáze nacházející se v systému jsou mezi sebou tak dobře promíchány, že je můžeme považovat za prolínající se kontinua.

4.3.1 Nastavení výpočtu

Jako počáteční podmínku pro výpočet vícefázového proudění byly použity hodnoty získané při výpočtu jednofázového proudění vody (viz. kapitola č.4.2). Vzhledem k tomu, že zvolená koncentrace pevné frakce je malá, můžeme předpokládat, že proudové pole vody nebude výrazněji ovlivněno. Počáteční podmínka pro rychlost pevných částic, které se v předchozím výpočtu nevyskytovaly, byla definována ručně jako $u=0.5 \text{ m/s}$ $v=w=0 \text{ m/s}$. Dále bylo třeba určit vlastnosti materiálu "písek". Vzhledem k tomu, že přenos tepla ani chemické reakce nejsou uvažovány, definujeme pouze jeho objemovou hmotnost $\rho=2650 \text{ kg/m}^3$.

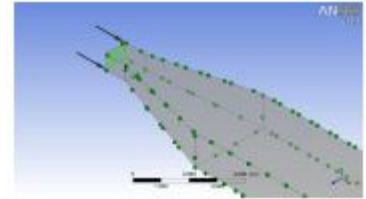
Vlastnosti domény, je nutno zvolit tak, aby bylo možné použít Multiphase modelu. Ten vyžaduje, aby byly v systému přítomny alespoň dvě různé fáze, z nichž alespoň jedna musí být definována jako kontinuální.

- **Souřadný systém** - nepohyblivý, kartézský
- **Přítomné fáze** - spojitě proudění vody (využívá přednastavených fyzikálních vlastností), rozptýlené částice písku (uživatelsky nastavené vlastnosti) o jednotném průměru 0.2 mm.
- **Typ modelu** - nehomogenní vícefázové proudění, Particle model
- **Gravitace** – složky gravitačního zrychlení vzhledem k osám souřadného systému
- **Model turbulentního proudění** - homogenní (pro obě fáze společný) model $k-\varepsilon$, uvažujeme i vznik a zánik turbulencí vyvolaných působením vztlakových sil
- **Přenos tepla, chemické reakce, tepelné záření** - neuvažujeme
- **Solid Pressure Model** - Gidaspow Model s koeficientem zachování energie 1.0 (určuje způsob vzájemné interakce částic)

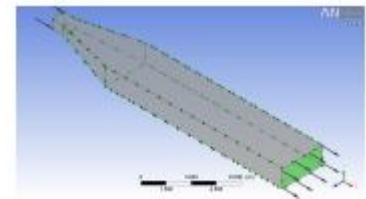
V dlouhodobém měřítku se jedná o proudění časově neustálené. Písek vstupující do domény se bude postupně usazovat u dna, měnit průtočnou plochu a tím i proudové pole. Cílem našeho výpočtu je však aproximovat pouze trajektorii

sedimentujících částic. Za předpokladu, že pro výpočet zvolíme krátký časový úsek takový, aby nedošlo k vytvoření vrstvy písku na dně, můžeme proudění považovat za ustálené.

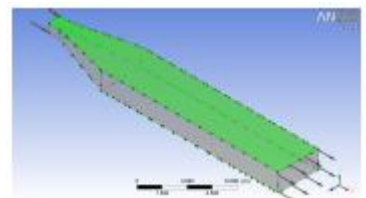
INFLOW - určuje vtok do systému. V nastavení zůstává podmínka *INLET* definovaná normálovou rychlostí společnou pro obě fáze $u=1.43 \text{ m/s}$. Obsah rozptýlených částic byl stanoven na jedno objemové procento tj. $26,5 \text{ kg/m}^3$. To odpovídá koncentraci splavenin na horském toku při zvýšeném průtoku. Průměr rozptýlených částic byl specifikován již v nastavení domény (0.2 mm). Vzhledem k tomu, že nemáme bližší informace o charakteru proudění před vtokem do lapáku, je intenzita turbulencí na vtoku opět zadána jako *střední*.



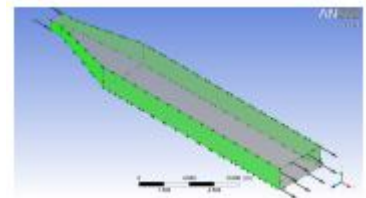
OUTFLOW - je podmínkou výtoku ze systému. Stejně jako pro jednofázové proudění použijeme okrajovou podmínku *OUTLET* s relativním tlakem 0 Pa. Tyto podmínky simulují stav, kdy za profilem outflow proudění pokračuje za obdobných podmínek.



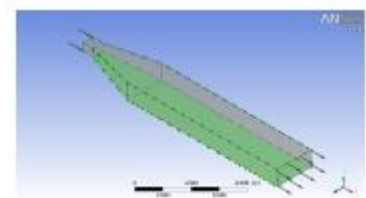
TOP - simuluje volnou hladinu. Stejně jako v předchozím případě je okrajová podmínka nastavena jako "Free Slip Wall" neovlivňující rychlostní pole. U rozptýlených částic očekáváme, že budou klesat ke dnu a nikoliv stoupat k hladině. Proto můžeme nastavit, že interakce s touto stěnou probíhá pouze prostřednictvím spojitého proudu vody. Budou tedy řešeny rovnice pouze pro jednu fázi, čímž dojde ke zjednodušení výpočtu, bez pozorovatelného vlivu na výsledek.



WALL - je podmínkou definující chování proudění na styku se stěnou lapáku a v její blízkosti. Ze stejných důvodů jako v č.4.2 byla zvolena podmínka "No Slip Wall". V předchozím výpočtu bylo ověřeno, že lapák je navržen hydraulicky vhodně. Proud unášející rozptýlené částice tedy nenaráží do stěn, ale klouže podél nich. Tato skutečnost společně s nízkou koncentrací rozptýlených částic (1% objemu) nás vede ke stejné zjednodušující podmínce jako v případě TOP. Interakce se stěnou probíhá pouze prostřednictvím spojitého proudu vody. Budou tedy řešeny rovnice pouze pro jednu fázi, čímž dojde ke zjednodušení výpočtu, bez pozorovatelného vlivu na výsledek.



BED - je stěnou lapáku, na níž se bude hromadit sediment. Na počátku výpočtu se jedná o stěnu se stejnými vlastnostmi jaké byly definovány pro WALL. Nastavíme tedy podmínku "No Slip Wall". Nelze již ovšem dojít ke stejnému zjednodušení jako výše a je třeba určit reakce se stěnou u obou fází. Výpočet chování proudění u stěny je řízen rovnicemi závislými na objemovém množství jednotlivých fází. Objemové množství písku zůstává po náš (velmi krátký) výpočtový čas konstantní. Ovlivnění rovnic by se projevilo po delším časovém úseku společně s rostoucím množstvím částic u dna.

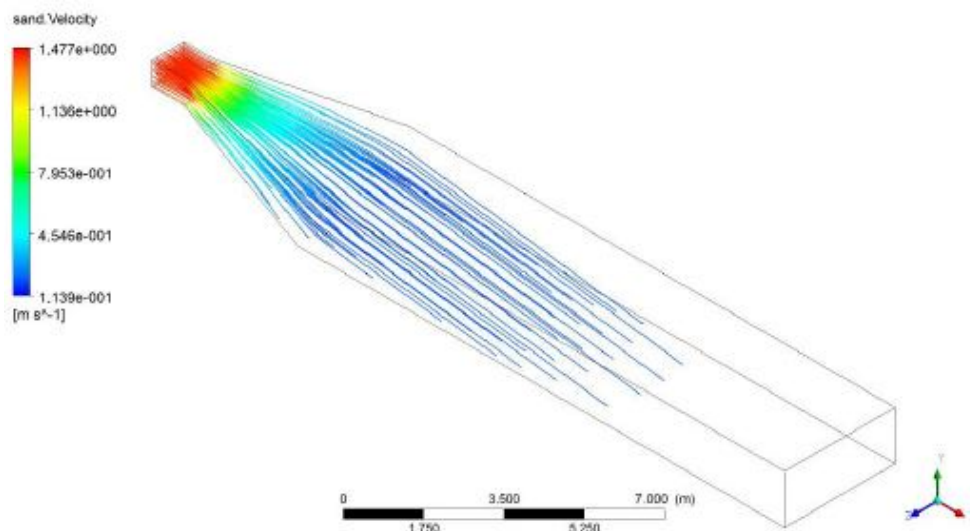


4.3.2 Průběh výpočtu a konvergence

Požadovanou měrou konvergence bylo opět zvoleno klesnutí všech sledovaných průměrných residuí od hodnotu $1.0e-03$. Aby bylo této hranice dosaženo, bylo potřeba 173 iterací. Minimální počet iterací byl však stanoven na 500, takže výpočet pokračoval a bylo dosaženo přesnějšího výsledku. Pětistá iterace byla provedena po 5 hodinách a 57 minutách. Společně s výpočtem pro inicializaci (jednofázové proudění vody) činil výpočtový čas 8 hodin 56 minut a bylo provedeno 1852 iterací.

4.3.3 Výsledky a jejich zhodnocení

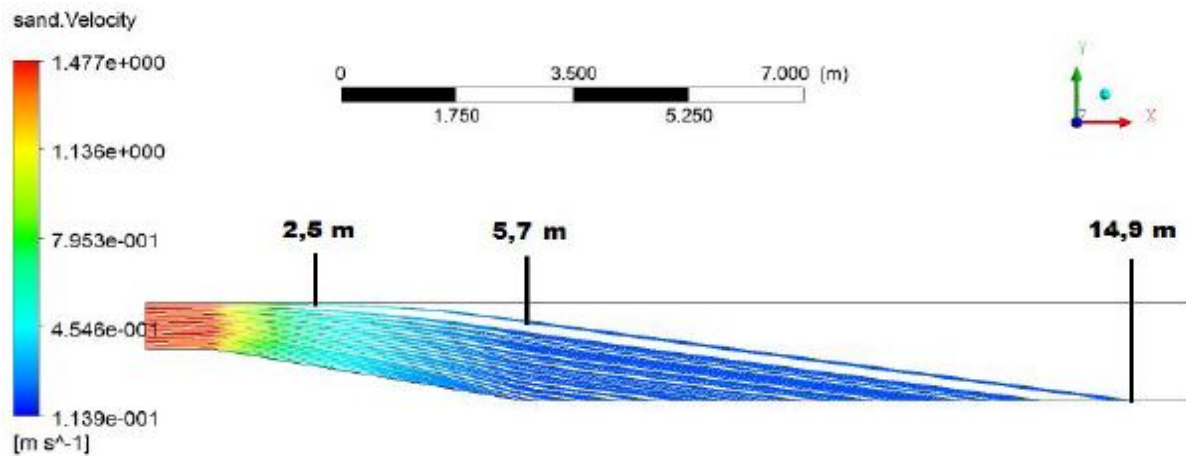
Z podstaty Multiphase modelu vyplývá, že není možné sledovat trajektorie konkrétních částic. Z průběhů rychlostí však získáme proudnice, jimiž lze pohyb částic charakterizovat. Na obrázku č.5 můžeme vidět, že nesené splaveniny se společně s proudem rozptýlí po celé průtočné ploše a klesají ke dnu. Celková rychlost částice je znázorněna barevnou škálou. Samotné sedimentační rychlosti se budeme věnovat níže.



Obr. 5: Multiphase model – proudnice pevné fáze

Je patrné, že podle matematického modelu nebude využita celá délka lapáku. Vede k tomu hned několik okolností. V konvenčním návrhu uvažujeme, že částice jsou nesené vodorovně i v přechodové části lapáku a jejich pokles začíná až v části sedimentační. Tento předpoklad vychází především z nemožnosti přesně určit intenzitu turbulencí v přechodové části. Z vypočítaných trajektorií částic však můžeme pozorovat, že jejich pokles ke dnu začíná již dříve. Ve spodních vrstvách je to proto, že jsou proudem strhávány do rozšiřující se průtočné plochy. V horní vrstvě, kde se změna proudění v horizontálním směru blíží nule, dochází k postupnému snížení rychlosti a pokles částic začíná zhruba po 1,5 metrech od vstupu do lapáku. Pro náš model jsme vycházeli z předpokladu, že na vtok do lapáku je proudění relativně ustálené a intenzita turbulencí není vysoká. V případě řešení reálné geometrie by bylo třeba tento předpoklad ověřit, a to buď modelem fyzikálním nebo matematickým modelem zahrnujícím i vtokový objekt a přívodní kanál. Také je třeba

vzít v úvahu, že zadanou podmínkou BED, dochází k jistému nadhodnocení účinnosti lapáku, když neuvažujeme možný odraz částic ode dna.



Obr. 6: Řez osou lapáku – proudnice pevné fáze

Na obrázku č.6 můžeme sledovat klesání částic z pohledu ve směru osy z. Jak je zde naznačeno, trajektorii částice můžeme rozdělit na tři úseky. První část trajektorie je přibližně vodorovná. Nachází se v úseku, kde je rychlost vody dostatečná na udržení částice ve vznosu. Zhruba při $x=2,5$ m, tedy 1,5 m za začátkem přechodové části se rychlost sníží natolik, že začne pokles částice. V sedimentační části ($x > 5,7$ m) je proudění již ustálené. Průtočná rychlost je konstantní stejně jako rychlost sedimentační. Částice tedy klesá po přímce.

Pojďme se nyní zaměřit na sedimentační rychlost. V kapitole č.2 je uvedena sedimentační rychlost částice ve stojaté vodě $v=0,028$ m/s. Pokud se částice nachází v tekoucí vodě, bude tato hodnota zmenšena o vliv turbulencí, které pokles částice zpomalují. Pro návrh lapáku byla uvažována rychlost klesání částice 0,02 m/s. Z našeho výpočtu vyplývá, že vliv turbulencí není tak výrazný. V sedimentační části lapáku písku, se rychlost poklesu částic ustálila na hodnotě 0.026 m/s.

Další výstupy viz. příloha obrázek 6.3.

4.4 Dvofázové proudění – Particle tracking

4.4.1 Nastavení výpočtu

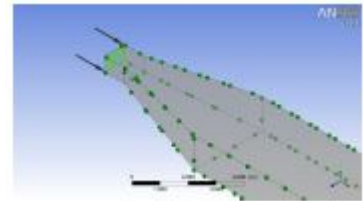
Počáteční podmínkou pro tento model, stejně jako pro Multiphase model, byly výsledky výpočtu jednofázového proudění vody popsaného v kapitole 4.2. Díky tomu jsou výsledky získané z obou modely porovnatelné. Při výpočtu pomocí Particle Tracking modelu dochází v prvním kroku k určení samostatného proudění spojitě fáze. Až poté jsou na základě získaných hodnot dopočítávány trajektorie jednotlivých částic (viz. kapitola 3.3).

- **Vlastnosti domény** volíme tak, aby došlo k použití Particle Tracking modelu. Proudění se bude skládat ze spojitě proudění vody a rozptýlených částic písku
- **Souřadný systém** - nepohyblivý, kartézský
- **Přítomné fáze** - spojitě proudění vody, rozptýlené částice písku o jednotném průměru 0.2mm

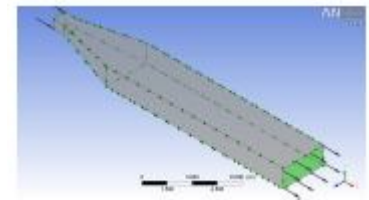
- **Gravitace** - zrychlení zadané ve vztahu k osám souřadného systému
- **Model turbulentního proudění** - homogenní (pro obě fáze společný) model $k-\varepsilon$, uvažujeme i vznik a zánik turbulencí vyvolaných působením vztahových sil
- **Přenos tepla, chemické reakce, tepelné záření** – neuvažujeme
- **Particle Coupling** - One-way coupling tj. částice jsou ovlivňovány spojitým prouděním, ale ony samy na něj vliv nemají

Budeme sledovat částice, které se na vtoku do systému nacházejí při hladině. Dá se předpokládat, že právě tyto částice budou mít nejdelší dobu sedimentaci a dorazí nejdále. Není tedy třeba sledovat velký počet částic. Protože částice zpětně neovlivňují ustálené proudění spojitě fáze, budeme celý proces považovat za ustálený.

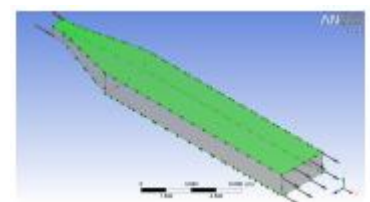
INFLOW Podmínka *INLET* byla pro proudění vody opět definována normálovou rychlostí $u=1.43 \text{ m/s}$ a střední intenzitou turbulencí na vtoku. Pro částice byla jako vstupní plocha zvolena horní část plochy *INLOW* o výšce 0.1m . Sledovány byly tedy částice, které do systému vstupují na náhodně vybraném místě do maximální hloubky 0.1m pod hladinou. Velikost plochy je $S=1*0.1\text{m}=0.1\text{m}^2$ z celkových 0.7m^2 . Pokud uvažujeme rovnoměrné rozdělení rozptýlených částic před vtokem, bude touto plochou vstupovat do systému poměrná část pevné fáze tj. 3.79 kg/m^3 z celkové koncentrace $26,5 \text{ kg/m}^3$ (což tvoří 1% objemu). Particle Tracking model nebere v úvahu interakci mezi částicemi samotnými, a při nastavení "One Way Coupling" ani ovlivnění kontinuální fáze jejich pohybem. Proto poměrné zmenšení objemu vstupující látky nebude mít vliv na získané výsledky. Sledováno bylo celkem deset částic o jednotném průměru 0.2mm .



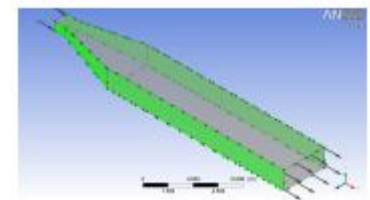
OUTFLOW - je podmínkou výtoku ze systému. Stejně jako pro jednofázové proudění použijeme okrajovou podmínku *OUTLET* s relativním tlakem 0 Pa . Tyto podmínky simulují stav, kdy za profilem outflow proudění pokračuje za obdobných podmínek.



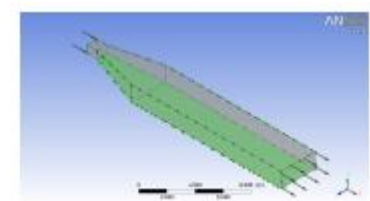
TOP - simuluje volnou hladinu. Stejně jako v předchozích případech je okrajová podmínka nastavena jako "Free Slip Wall", neovlivňující rychlostní pole kontinuální fáze.



WALL - je podmínkou definující chování proudění na styku se stěnou lapáku a v její blízkosti. Ze stejných důvodů jako v 4.2, byla zvolena podmínka "No Slip Wall". Model vyžaduje nastavení koeficientu zachování rychlosti pro částice narážející do stěny. Předpokládejme variantu pro nás nejméně výhodnou, a to dokonale pružný odraz. Částice, která narazí do stěny, se odráží dopadovou rychlostí pod stejným úhlem jako je úhel dopadu.



BED - je stěnou lapáku, na níž se bude hromadit sediment. Pro výpočet proudění vody se jedná o "No Slip Wall". Nastavení chování částic při interakci se stěnou je při



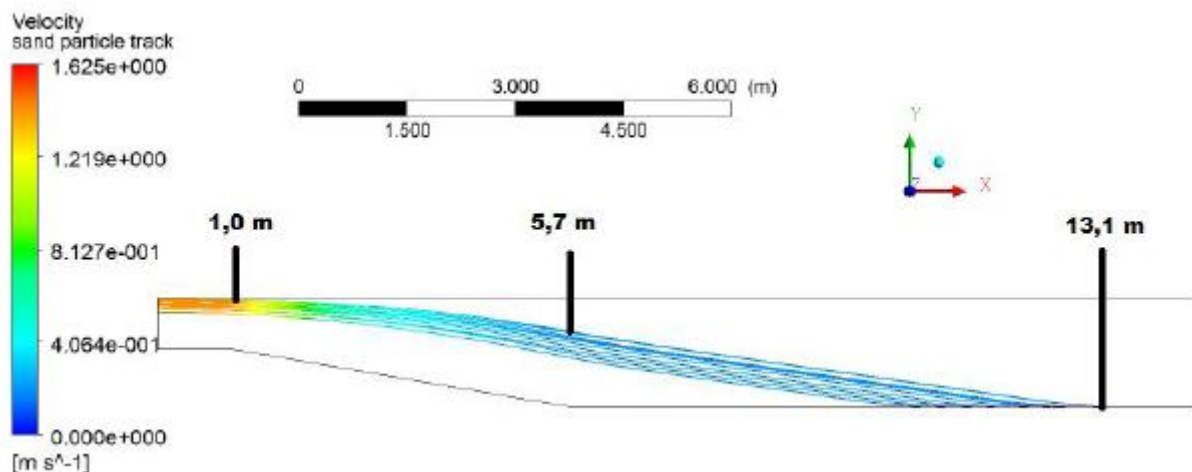
řešení problému sedimentace zásadní. Pro náš výpočet byla zvolena podmínka, poprvé použita Stovinem a Saulem v roce 1998. Ta předpokládá, že každá částice, které dosáhne dna lapáku je zde zachycena. Z dříve provedených výzkumů vyplývá, že při použití tohoto nastavení dochází k nadhodnocení účinnosti lapáku písku. Při vyhodnocování výsledků je třeba mít tuto skutečnost na paměti.

4.4.2 Průběh výpočtu a konvergence

Časový krok pro Particle Tracking model byl zvolen stejně jako v předchozích výpočtech na 0.001 s. Zvolený časový krok byl příliš dlouhý. Přestože hodnoty residuí klesly téměř k hodnotě 1.0e-03, v dalších iteracích pomalu stoupají (výpočet diverguje). Proto jsme přistoupili ke zkrácení časového kroku na 0.0001s. To vedlo ke zlepšení průběhu výpočtu. Hodnoty rychle klesly pod 1.0e-03 a i poté pokračovaly v poklesu. Je však patrné, že pokles je velmi pomalý a další konvergence výpočtu by vyžadovala mnoho iterací. Bylo by tedy vhodné uvažovat o dalších úpravách nastavení vedoucích ke zrychlení konvergence.

4.4.3 Výsledky a jejich zhodnocení

Jelikož bylo možné sledovat pouze několik částic, byly vybrány pouze ty, které do systému vstupují při hladině. Pokles částic začíná téměř okamžitě po jejich vstupu do přechodové oblasti lapáku (viz. příloha obr. 6.4) a pokračuje o něco rychleji než v případě Multiphase model. Přestože Particle Tracking model nenabízí možnost přímého měření rychlosti částice ve směru y, je možné tuto rychlost dopočítat z vykreslené trajektorie. Průměrná rychlost klesání částic v sedimentační oblasti lapáku je 0,028 m/s, což odpovídá uvažované rychlosti klesání v klidné vodě.



Obr. 6: Řez osou modelu – trajektorie částic

Není pravděpodobné, že by skutečná sedimentační rychlost v proudící vodě dosáhla hodnot sedimentační rychlosti ve vodě stojaté. Tento fakt (společně s velmi pomalou konvergencí) poukazuje na zkreslení výsledků matematického modelu. Nabízí se dvě možná řešení. V první řadě by bylo vhodné nechat proběhnout více iterací. Právě nedostatečná konvergence výpočtu je často zdrojem chyb. Pokud by zlepšení konvergence nebylo dostačující, je na řadě úprava nastavení okrajových podmínek, která povede ke zpřesnění matematického modelu.

Závěr

V první části práce jsme se zaměřili na návrh lapáku písku. Hydraulická vhodnost návrhu byla ověřena pomocí jednofázového modelu proudění vody, jehož výsledky se současně staly výchozím bodem pro výpočty vícefázových modelů. Tvar proudnic i rychlostní pole vody ukazuje, že rozptýlení vody do celého průtočného profilu lapáku probíhá plynule, čímž je potvrzena hydraulická správnost návrhu. Rychlost proudění v sedimentační části lapáku písku se pohybuje v rozmezí 0,17 – 0,19 m/s a je tedy nižší než limitní hodnota 0,2 m/s.

V druhé části jsme se zaměřili na dvoufázové proudění vody a splavenin (písku). Výpočet byl proveden oběma modely dostupnými v programu CFX - "Multiphase" a "Particle Tracking". Přestože výstupy z "Particle Tracking" modelu nemůžeme považovat za plně uspokojivé, podařilo se nám prokázat využitelnost matematického modelování pro návrh lapáku. Díky simulaci proudění včetně turbulencí, můžeme uvažovaný počátek poklesu částic posunout už do přechodové části lapáku a tím zkrátit lapák i o několik metrů. Aby mohl být model používán v praxi, je třeba jej konfrontovat s výsledky naměřenými na stávajících stavbách příp. na fyzikálních modelech a provést jeho kalibraci. Jen tak může být spolehlivým nástrojem pro posouzení navrhovaných konstrukcí.

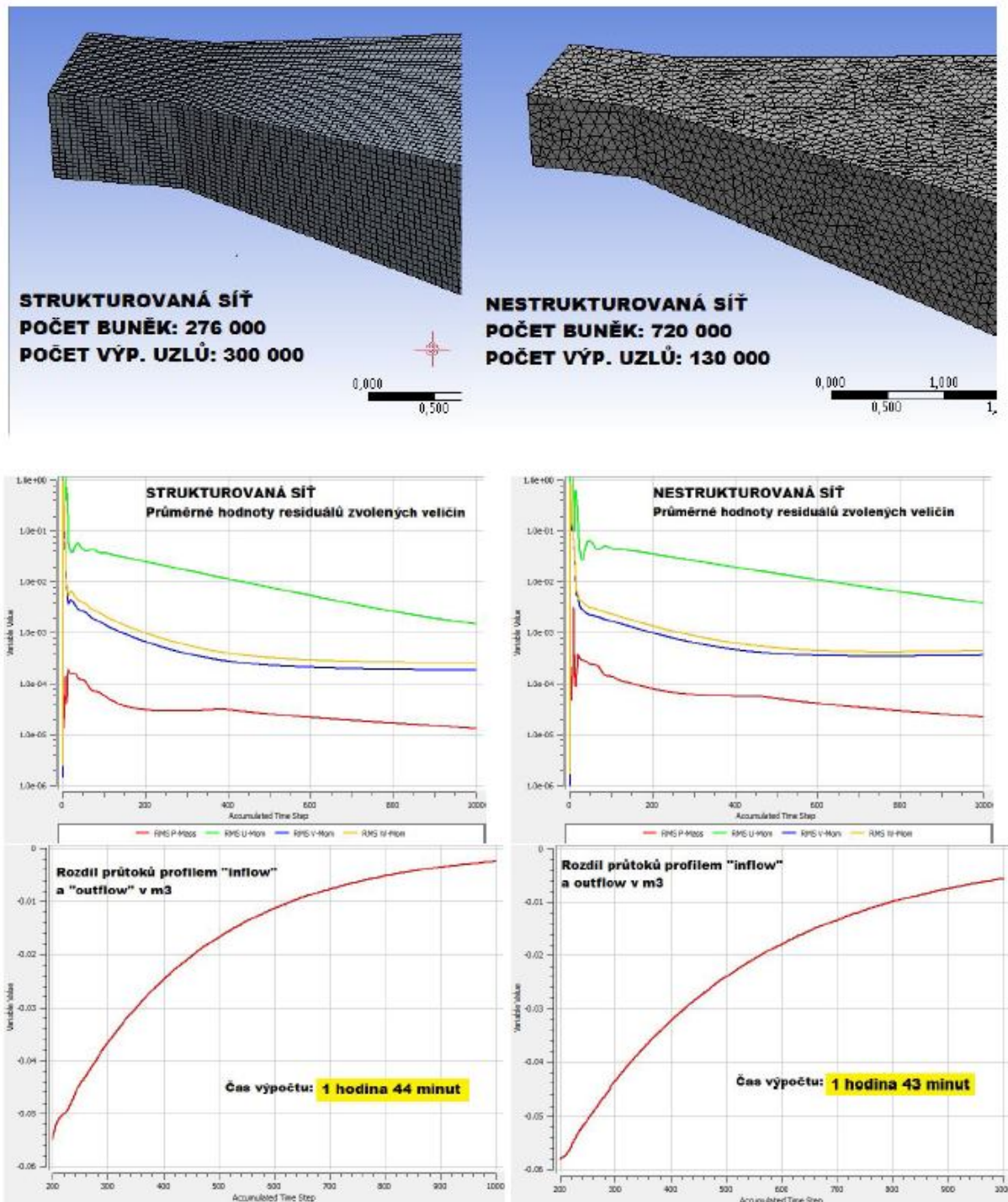
Eva Škařupová

Literatura

- [1] A. Adamson, V. Stovin, L. Bergdahl: *Bed shear stress Boundary Condition for Storage Tank Sedimentation*. Journal of Environmental Engineering, str. 651-658, Volume 129, July 2003
- [2] *ANSYS Modeling and Meshing Guide*. Program documentation for Release 12.0, April 2009
- [3] *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Program documentation for Release 12.0, April 2009
- [4] *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Program documentation for Release 12.0, April 2009
- [5] Dufresne, Vazquez, Terfous, Ghenaim, Poulet: *Experimental investigation and CFD modeling of flow, sedimentation, and solids separation in combined sewer detention tank*. Computers and Fluids, str. 1042-1049, Volume 38, 2009
- [6] S.Jayanti, S Narayanan: *Computational Study of Particle Eddy-Interaction in Sedimentation Tanks*, Journal of Environmental Engineering, str. 37-49, Volume 130, January 2004
- [7] Joel H. Ferziger, Milovan Perić: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 2002; ISBN 3-540-42074-6
- [8] Jurgen Gisecke, Emil Mosonyi: *Wasserkraftanlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, 5. upravené a doplněné vydání; ISBN 978-3-540-88988-5
- [9] Milada Kozubková: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX* Ostrava, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008
- [10] Nils Reidas B. Olsen: *Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering, class notes*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, červen 1999; ISBN 82-7598-041-0
- [11] Vischer, D./Huber, A.: *Wasserbau*. Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern. Third edition. Springer-Verlag, Berlin, 1982

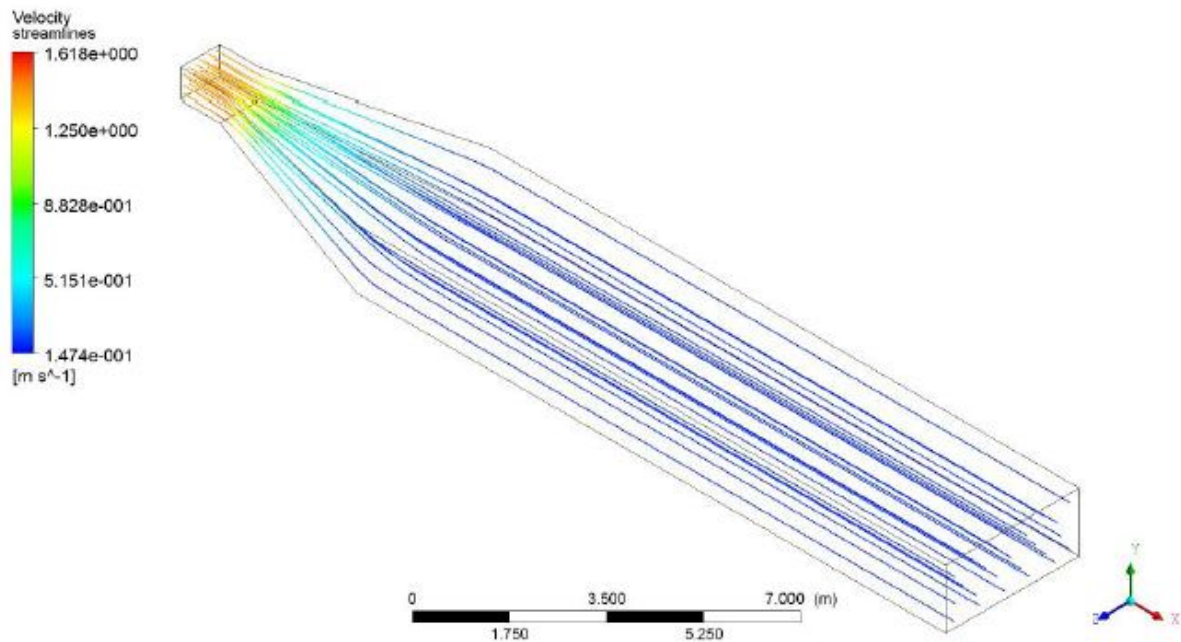
Přílohy

Obrázek 6.1 – Průběh výpočtu na strukturované a nestruturované síti

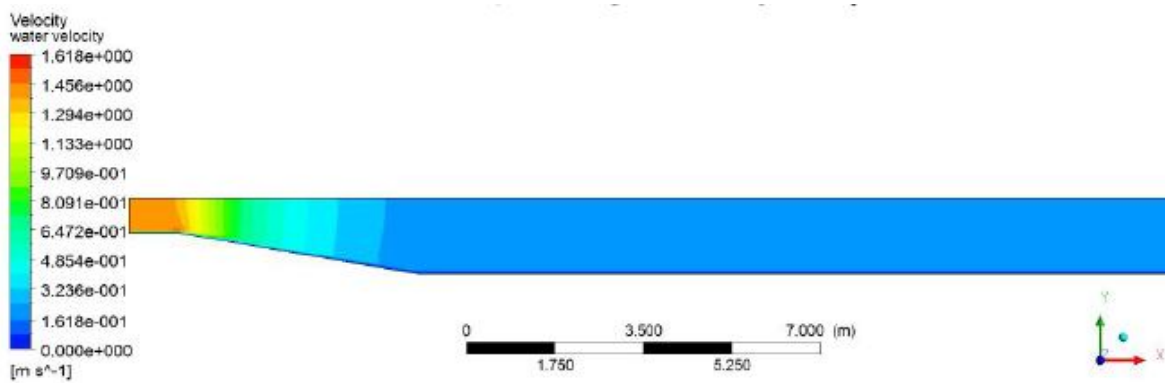


Obrázek 6.2 – Jednofázové proudění vody

a) proudnice, na barevné škále rychlost



b) rychlost proudění

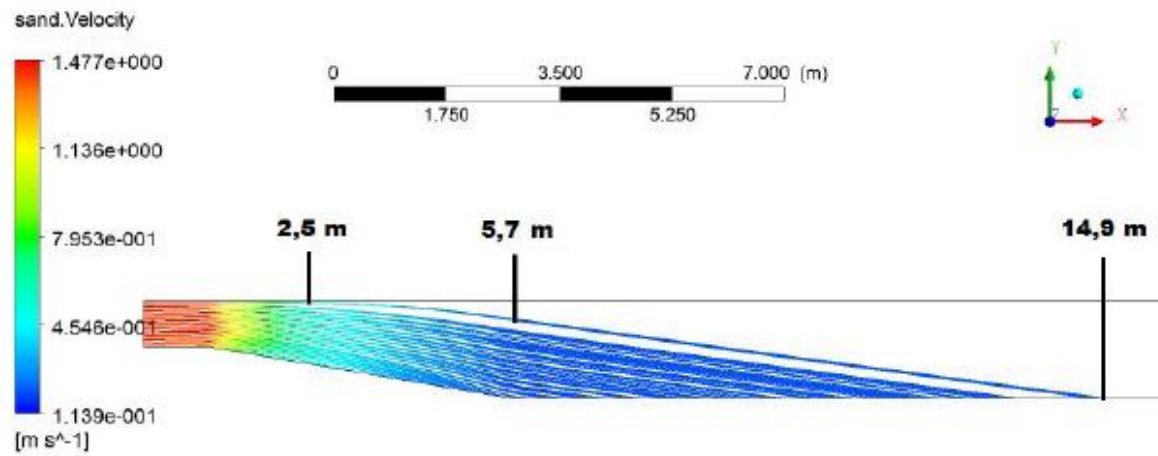


c) tlak

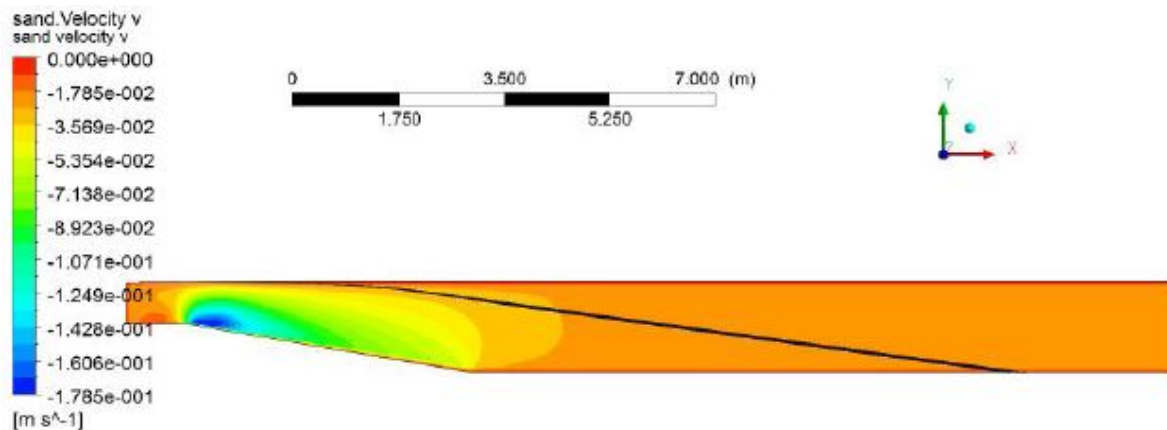


Obrázek 6.3 – Dvofázové proudění – Multiphase model

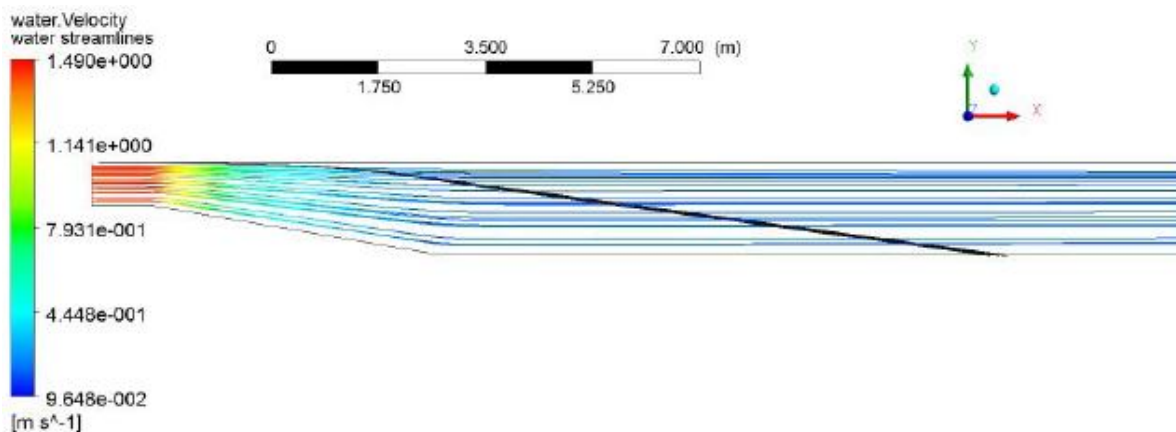
a) trajektorie splavenin, na barevné škále celková rychlost částice



b) na barevné škále rychlost sedimentační rychlost, tmavě krajní (nejnepříznivější) trajektorie částice

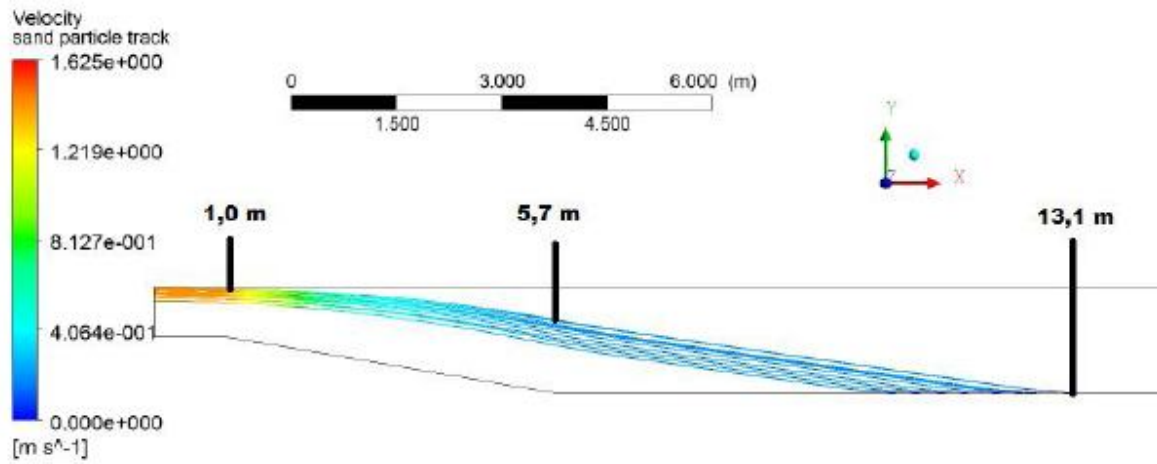


c) proudnice vody, na barevné škále rychlost proudění, tmavě krajní (nejnepříznivější) trajektorie částice



Obrázek 6.4 – Dvoufázové proudění – Particle Tracking model

a) trajektorie splavenin, na barevné škále celková rychlost částic



b) trajektorie splavenin, na barevné škále rychlost proudění vody

