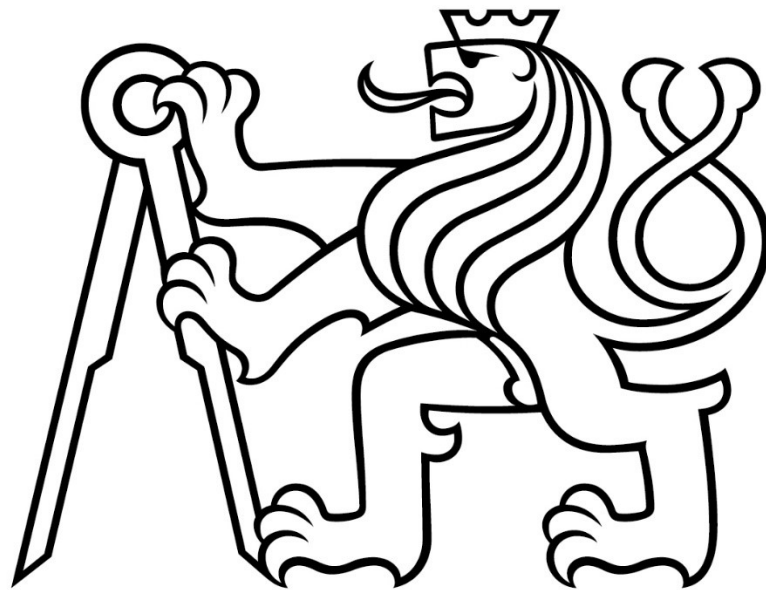


**České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Porovnání hydraulické drsnosti 3D modelu CFX

Comparison of hydraulic roughness using 3D model CFX

Autor:

Vít Petržílek

Vedoucí práce:

Dr. Ing. Petr Nowak

Praha 2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Petržilek Jméno: Vít Osobní číslo: 468562  
Zadávací katedra: Katedra Hydrotechniky  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Porovnání hydraulické drsnosti 3D modelu CFX

Název bakalářské práce anglicky: Comparison of hydraulic roughness using 3D model CFX

Pokyny pro vypracování:

Vytvoření 3D modelu zdiva fotogrametrickou metodou, aplikace struktury zdiva prizmatického žlabu do modelu Ansys CFX, výpočet ustáleného rovnoměrného proudění s následným zpětným ověřením drsností dle Manninga, provedení shodného výpočtu při zadání absolutní hydraulické drsnosti rovinných stěn a dna žlabu.

Seznam doporučené literatury:

User's manual CFX  
meshroom manual  
hydraulika otevřených koryt

Jméno vedoucího bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání bakalářské práce: 20.02.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 17.5.2020  
*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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

19.2.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“

V Praze dne 17.5.2020

.....

Podpis studenta

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Dr. Ing. Petru Nowakovi za jeho odborné vedení, vstřícnost a předání cenných rad při psaní bakalářské práce. Následně bych rád poděkoval paní Ing. Evě Bílkové za veškeré odborné konzultace a pomoc s řešením problematiky matematického modelování. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Vránkovi za odborné konzultace a v neposlední řadě své rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole.

**Abstrakt:**

Cílem autora bakalářské práce bylo pro zvolený typ kamenného obkladu zjistit hydraulickou drsnost, respektive hodnotu „n“, která charakterizuje hydraulické ztráty v korytě. V dnešní době se Manningova hydraulická drsnost pouze odhaduje podle tabulek a ve většině případech bývá nadhodnocována. Přesnou hodnotu této veličiny můžeme získat pouze na základě získaných zkušeností z praxe. Za pomoci moderních technologií byl autor schopen tuto hodnotu přesněji ověřit. V bakalářské práci je využita fotogrammetrie pro přenesení opravdového kamenného obkladu s kameny a spárami do 3D modelu v měřítku 1:1, a za pomoci matematického modelování byla v softwaru Ansys CFX vypočítána odpovídající hodnota „n“ s následným porovnáním hodnoty průměrného pískového zrna pro specifický kamenný obklad.

**Klíčová slova:**

Matematický model, Ansys CFX, Fotogrammetrie, Manningova hydraulická drsnost, ICEM CFD, Rhino 3D

**Abstract:**

The aim of the author of this Bachelor thesis was to determine the hydraulic roughness coefficient (respectively the “n” value which characterises hydraulic losses in the open channel) of a given type of stone cladding. Currently, Manning’s hydraulic roughness coefficient is solely estimated according to tables and in most cases the values are overestimated. The exact value of this coefficient can be obtained only on the basis of gained practical experience. Through the use of modern technologies, the author of this work was able to verify this value more precisely. For the purpose of this Bachelor thesis the following technologies were used: photogrammetry for transferring the real-life stone cladding with stones and joints into a 3D model of a 1:1 scale; mathematical modelling, which via the Ansys CFX software, computed the corresponding “n” value “ together with a subsequent comparison of the values of an average grain of sand used in stone cladding.

**Key words:**

Mathematical modelling, Ansys CFX, Photogrammetry, Manning’s hydraulic roughness, ICEM CFD, Rhino 3D

## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
1.1. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE .....	4
<b>2. PROUDĚNÍ V OTEVŘENÉM KORYTĚ</b> .....	<b>5</b>
2.1. PROUDĚNÍ VAZKÉ TEKUTINY .....	6
2.2. REYNOLDSOVO ČÍSLO .....	6
2.2.1. <i>Laminární proudění</i> .....	7
2.2.2. <i>Turbulentní proudění</i> .....	7
2.3. ROZDĚLENÍ RYCHLOSTÍ V PRŮŘEZU .....	8
2.3.1. <i>Rychlosti ve směru vertikálním</i> .....	8
2.3.2. <i>Rychlosti ve směru horizontálním</i> .....	8
2.4. MEZNÍ VRSTVA U STĚNY .....	9
2.4.1. <i>Tloušťka mezní vrstvy</i> .....	10
2.4.2. <i>Drsnost povrchu</i> .....	11
2.5. MANNINGŮV SOUČINITEL DRSNOSTI <b>n</b> .....	12
2.6. USTÁLENÝ ROVNOMĚRNÝ POHYB V OTEVŘENÝCH KORYTECH.....	15
<b>3. FOTOGRAMMETRIE</b> .....	<b>16</b>
3.1. METODA STRUCTURE FROM MOTION (SFM).....	16
3.2. NALEZENÍ VHODNÉ STĚNY PRO ŽLAB .....	17
3.3. PŘEVEDENÍ STĚNY DO 3D MODELU .....	19
3.4. VYTVOŘENÍ UMĚLÉHO ŽLABU .....	21
3.5. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ METODY SFM.....	22
<b>4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ</b> .....	<b>23</b>
4.1. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS .....	23
4.2. METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ (FVM) .....	23
4.3. VHODNÉ POUŽITÍ CFD .....	24
4.4. ŘEŠIČ CFD ÚLOHY – ANSYS CFX.....	24
4.5. NASTAVENÍ MATEMATICKÉHO MODELU.....	25
4.5.1. <i>Výpočetní síť</i> .....	25
4.5.2. <i>Nastavení vlastností modelu</i> .....	26
4.5.3. <i>Počáteční podmínky</i> .....	26
4.5.4. <i>Okrajové podmínky</i> .....	27
4.5.5. <i>Konvergence</i> .....	29
4.6. VÝPOČET MODELU Z FOTOGRAMMETRIE .....	30
4.6.1. <i>Spuštění prvního výpočtu</i> .....	30
4.6.2. <i>Korekce výpočetní sítě</i> .....	33

4.6.3.	<i>Korekce výpočtu</i> .....	34
4.6.4.	<i>Vlnění hladiny</i> .....	38
4.6.5.	<i>Ověření rovnoměrného ustáleného proudění</i> .....	40
4.6.6.	<i>Vyhodnocení drsnostního součinitele</i> .....	41
	<i>    Citlivostní analýza</i> .....	42
4.6.7.	<i>Ověření čáry energie</i> .....	43
4.7.	VÝPOČET ROVINNÉHO ŽLABU .....	45
<b>5.</b>	<b>VYHODNOCENÍ</b> .....	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>SHRNUTÍ</b> .....	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCE</b> .....	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>54</b>
8.1.	POROVNÁNÍ 3D MODELU Z FOTOGRAMMETRIE SE SNÍMKEM KAMENNÉHO OBKLADU .....	54
8.2.	ZOBRAZENÍ VÝSLEDNÝCH 3D MODELŮ.....	55
8.3.	VYKRESLENÍ RYCHLOSTÍ VE STANIČENÍ $x = 16,00$ M.....	56
8.4.	VYKRESLENÍ RYCHLOSTÍ V USTÁLENÉM ROVNOMĚRNÉM ÚSEKU .....	57
8.5.	PODÉLNÝ ŘEZ V USTÁLENÉM ROVNOMĚRNÉM ÚSEKU .....	58
8.6.	ZOBRAZENÍ USTÁLENÉHO PROUDĚNÍ PŘI RYCHLOSTI 2,10 M/S .....	59
8.7.	DETAIL ZOBRAZENÍ USTÁLENÉHO PROUDĚNÍ PŘI RYCHLOSTI 2,10 M/S.....	60
8.8.	HODNOTY MANNINGOVA DRSNOSTNÍHO SOUČINITELE $n [17]$ .....	61



# 1. ÚVOD

V dnešní době, kdy je kladen větší důraz na ekonomii při hledání nejvhodnějšího řešení, je fyzikální a matematické modelování čím dál tím více využívanější. Můžeme nejdříve problém vyřešit za pomoci menšího modelu, nebo problém přenést do softwaru, kde předělání modelu nestojí tolik peněz, jako kdyby byl už postavený. To nám dává možnost zkoušet více variant a dostat se k nejvhodnějšímu a ekonomicky přívětivému výsledku.

Matematické modelování je díky rozvoji výpočetní techniky čím dál tím více dostupnější. Můžeme řešit úlohy, které by bylo možné řešit ve fyzikálním modelování jen obtížně. Výhodou je, že není potřeba pronajímat obrovské prostory pro postavené modely, jejichž následné úpravy jsou daleko jednodušší. Díky technologiím jsme také schopni za krátkou dobu udělat řadu výpočtů, které můžeme jednoduše vyhodnotit.

V bakalářské práci bylo provedeno ověření hydraulické drsnosti stěny žlabu, díky kterému můžeme určit hydraulické ztráty v korytě. Hodnota se v dnešní době spíše odhaduje a její správný odhad bývá na základě zkušeností z praxe. V matematickém modelování jsme v současnosti zvyklí modelovat stěny žlabu jako rovinné stěny a přidávat jim vlastnost popisující drsnost průměrného pískového zrna v celém modelu, díky tomu jsou hydraulické ztráty v celém úseku stejné, ale v reálných případech tomu tak není. V této úloze, za pomoci moderních technologií jako fotogrammetrie, byl vytvořen model, který má kamenný obklad v měřítku 1:1 a pro daný model byla spočtena jeho hydraulická drsnost s následným porovnáním hodnoty průměrného pískového zrna na modelu s rovinnými stěnami a stejným objemem.

## 1.1. Specifikace cílů práce

- Vytvoření 3D modelu za pomoci fotogrammetrie a následného vytvoření žlabu
- Na vytvořeném modelu žlabu zajistit rovnoměrné ustálené proudění
- Za pomoci Chézyho a Bernoulliho rovnice získat Manningovu hydraulickou drsnost, respektive hodnotu „n“
- Provedení shodného výpočtu žlabu s rovinnými stěnami a určení odpovídající drsnosti průměrného pískového zrna pro odpovídající kamenný obklad.

## 2. PROUDĚNÍ V OTEVŘENÉM KORYTĚ

Počátek setkání lidstva s proudící kapalinou v otevřeném korytě se přibližně datuje k době, kdy vznikaly první osady kolem řek pro stálý přísun pitné a užitkové vody. Námí známe nejstarší civilizace vznikaly právě v oblastech velkých řek, jakou jsou například Nil, Tigris, Chang-jiang. Řeky jsou považovány za první obchodní cesty, kdy za pomoci plavidla byly převáženy suroviny a těžké materiály do blízkých osad za účelem zisku.

Díky různorodé morfologii terénu si můžeme všimnout, že pokud se plavíme po řece unášecí rychlostí, naše rychlost se proměnlivě mění. Hlavními vstupujícími aspekty je množství vody v korytě, tedy hydraulický poloměr  $R$  [m], morfologie dna koryta, tedy sklon čáry energie  $i$  [-] a rychlostní součinitel  $C$  [ $m^{0.5}s^{-1}$ ], který vyjadřuje hydraulické odpory koryta. První odvození zmíněných veličin popsal francouzský inženýr Antoine de Chézy v 18. století. [1] Chézyho rovnice je známá ve tvaru:

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (2.1)$$

Po dosazení do rovnice kontinuity získáme vztah pro výpočet průtoku:

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (2.2)$$

Hydraulický poloměr  $R$  lze získat z omočeného obvodu námi zvoleného průřezu. Sklon čáry energie  $i$  lze zjistit za pomoci Bernoulliho rovnice, ale vzniká otázka, kam se všemi ostatními vlastnostmi vody? Voda je přeci nedokonalá tekutina, její částice v pohybu naráží na částice v klidu, které strhávají a mění jejich trajektorii a rychlost, která nemůže být větší než rychlost částice předešlé. To vypovídá o jisté viskozitě a přilnavosti. Přilnavosti k povrchu, respektive ke dnu, stěnám koryta a kontaktu se vzduchem. Na povrchu vzniká tření, které způsobuje jevy jako například vír či ráz. [1]

## 2.1. Proudění vazké tekutiny

V teoretické části se setkáváme s kapalinou, která nezahrnuje vnitřní tření ani přenos tepla. Takovou kapalinu nazýváme dokonalá tekutina. Jedná se pouze o zjednodušení výpočetní metody, protože většina procesů při pohybu skutečných tekutin se tímto způsobem popsat nedá. [2] Touto problematikou se zabýval Isaac Newton, který popsal chování kapaliny jako přímou úměru mezi napětím a rychlostí deformace, kde konstantou úměrnosti je dynamická viskozita. [3] Při pohybu nestlačitelné tekutiny dochází k disipaci mechanické energie, tedy při určité proudnici není součet geodetické, tlakové a rychlostní výšky konstantní. Tento jev vzniká ovlivňováním částic tekutin mezi sousedícími částicemi. Například částicemi pohybujícími se různou rychlostí a ovlivňujícími své sousedící částice. Jedná se o nevratné děje zapříčiněné existencí vnitřního tření a přenosu tepla. [2] Proudění můžeme rozdělit na dva rozdílné typy. Prvním prouděním je proudění laminární (vrstevnaté) a druhým je turbulentní (nepravidelné).

## 2.2. Reynoldsovo číslo

Právě Reynolds v 19. století objevil existenci dvou typů proudění. Na svůj objev přišel díky skleněnému žlabu, do kterého vložil injektor pro dávkování barviva. Tento objev učinil ve své laboratoři na univerzitě v Manchesteru. Závěrem jeho studie byla existence laminárního a turbulentního proudění. U laminárního proudění obarvený proud kapaliny zachoval svoji barvu a trajektorii, naopak při turbulentním proudění bylo barvivo rozptýleno po celém žlabu, a to díky neuspořádanému pohybu částic v kapalině. Pro rozlišení mezi turbulentním a laminárním prouděním používáme základní kritérium poměru setrvačných a vazkých sil v podobě Reynoldsova čísla: [4]

(2.3)

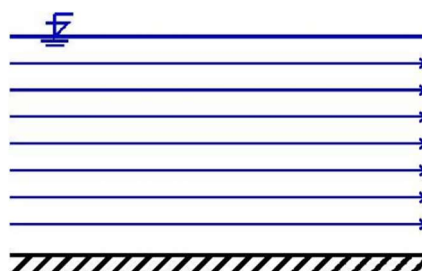
$$Re = \frac{v \cdot R}{\nu}$$

kde  $v$  vyjadřuje střední průřezovou rychlost [m/s],  $R$  je hydraulický poloměr [m],  $\nu$  viskozita kapaliny [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]

Pokud jsou setrvačné síly mnohem větší než působící vazké síly, jedná se o proudění turbulentní. [4] Pro otevřená koryta se uvažuje laminární proudění pro  $Re < 580$ , při mírném nárůstu rychlosti se proudění laminární může uchovat až do  $Re = 3450$ . Mezi oběma hranicemi je přechodová oblast. [5]

### 2.2.1. Laminární proudění

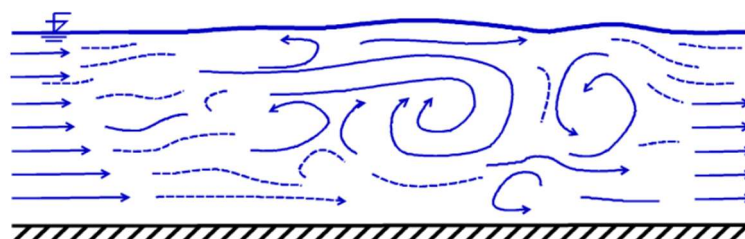
Laminární pohyb po skloněném dně s volnou hladinou je specifický tím, že vrstva kapaliny má konstantní hloubku. Při laminárním proudění se částice pohybují po rovnoběžných souběžných drahách a částice se nikterak neovlivňují. Můžeme říci, že se pohybují po vrstvách, které se navzájem nepromíchávají a neovlivňují okamžité bodové rychlosti co do velikosti i směru – tzv. nedochází k fluktuacím rychlosti. [2] Tento jev je zobrazen na *Obrázku 1*.



Obrázek 1 Laminární proudění [4]

### 2.2.2. Turbulentní proudění

Pro turbulentní proudění je specifická jeho nepravidelná změna rychlosti a tlaku za jednotku času, přičemž pohyb se projevuje náhodně. Jednotlivé částice do sebe narážejí a vzniká promíchávání tekutiny. Při turbulentním proudění se zvětšuje vnitřní tření a přenos tepla, zároveň nedochází k ustálení hloubky. [2] Jevo turbulentního proudění je zobrazen na *Obrázku 2*.



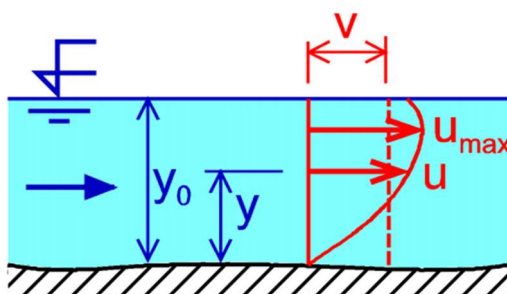
Obrázek 2 Turbulentní proudění [4]

## 2.3. Rozdělení rychlostí v průřezu

Tření kapaliny o stěny a kontakt s otevřenou hladinou v průřezu způsobuje nerovnoměrné rozdělení rychlostí. Jedná se o složité tvary, které je nutné rozdělit na jednotlivé průřezy. [2]

### 2.3.1. Rychlosti ve směru vertikálním

Jeden z Galileových žáků se domníval, že největší rychlost ve vertikálním směru se nachází na samotném dně, tento předpoklad odvozoval z chování kapaliny vytékající z nádoby, kdy při odlišných výškách otvorů působil jiný hydrostatický tlak. Jeho postupnou lineární změnu uvažoval jako trojúhelník s vrcholem na hladině. Správný popis hydraulického jevu popsal až Pitot, který za pomoci své Pitotovy trubice udělal řadu přímých měření. Pitot odvodil, že odpor dna zpomaluje proudnice a rychlost se snižuje směrem ke dnu. K upřesnění došlo až na řece Mississippi, kde Bazin konal více měření a došel k názoru, že největší rychlost je přibližně v 1/3 hloubky od hladiny. [1] V širokých a mělkých korytech s vyšší rychlostí proudu, nebo s minimální hydraulickou drsností stěn, můžeme říct, že maximální průřezová rychlost se nachází na hladině. [2] Za správné vykreslení rychlostí ve směru vertikálním můžeme považovat *Obrázek 3*.



*Obrázek 3 Vliv drsnosti na rozdělení rychlostí v korytě [6]*

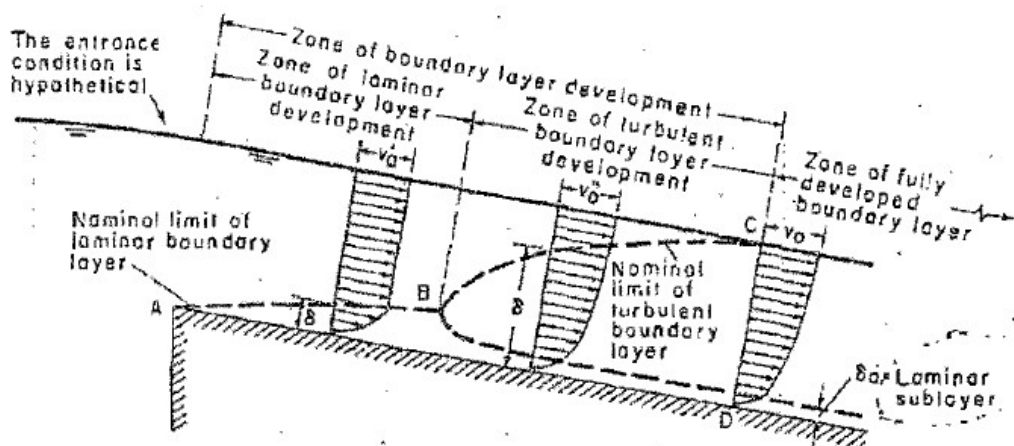
### 2.3.2. Rychlosti ve směru horizontálním

U pravidelných profilů má tendenci rychlost od středu ke břehu klesat a připomíná parabolu druhého stupně s vrcholem v ose koryta. Christen udává pro prizmatická koryta parabolu osmého stupně. U koryt nepravidelných jsou rychlostní křivky závislé na hloubce a jeví podobnost s tvarem koryta. [1]

## 2.4. Mezní vrstva u stěny

Jestliže kapalina obtéká těleso, musíme kapalinu považovat za viskózní. V opačném případě, pokud je kapalina dostatečně daleko od kontaktu s tělesem, můžeme jí prohlásit za ideální kapalinu, tedy neviskózní. Použití mezní vrstvy uvažueme u obtékání těles proudící kapalinou, kde jsou viskózní síly řádově stejně velké jako setrvačné síly. [7]

Dle Chowa mění kapalina svou rychlost v příčném průřezu s rostoucí vzdáleností od vstupu do koryta z důvodu mezní vrstvy. Jestliže máme prizmatické koryto a průtok s drsností je konstantní, tak se po určité vzdálenosti rozdělení rychlostí ustálí a dosáhne jednotného tvaru. Přehledný popis mezní vrstvy je zobrazen na *Obrázku 4*, kde je popsán průběh mezní vrstvy v otevřeném korytě. Při vstupu do koryta se začíná vytvářet laminární mezní vrstva začínající v bodě A. Mezní vrstva se vyvíjí podél povrchu koryta a je znázorněna křivkou AB. Rozložení rychlostí je přibližně parabolické. Kapalina se pohybuje v laminárním proudění po určitou vzdálenost, dokud kapalina v mezní vrstvě nezmění své proudění na turbulentní začínající v bodě B. Vývoj turbulentní mezní vrstvy je znázorněn křivkou BC. Rychlostní rozložení je přirovnáno k logaritickému průběhu. [8]



Obrázek 4 Průběh působení mezní vrstvy v otevřeném korytě [8]

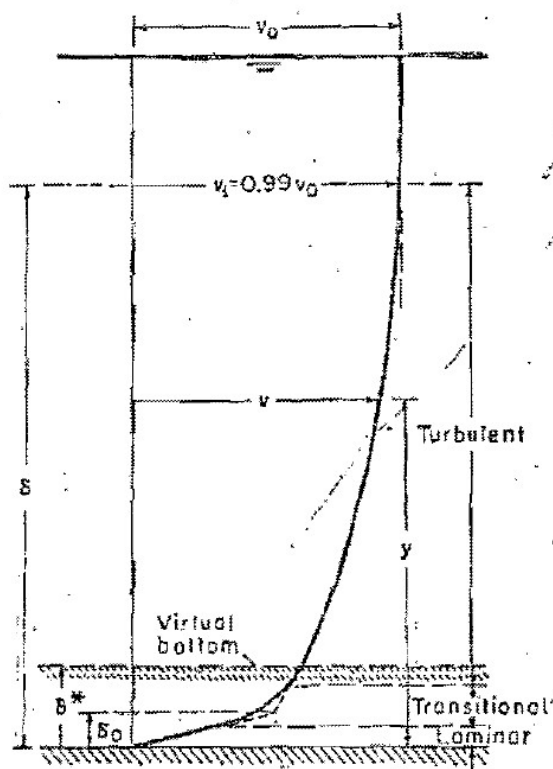
### 2.4.1. Tloušťka mezní vrstvy

Tloušťka mezní vrstvy není tolik znatelná, a proto je dle Chowa vyjádřena tloušťkou  $\delta$ . Tloušťka byla vyjadřována několika způsoby. Jednou definicí je, že  $\delta$  je rozsah normálové vzdálenosti od mezního povrchu, kde rychlost  $v_1$  je rovna 99% rychlosti  $v_0$ , ke které se křivka mezní vrstvy blíží asymptoticky. [8] Tato definice je přehledněji popsána na *Obrázku 5*. Důsledkem působení mezní vrstvy na proud je posunutí dna koryta na fiktivní pozici o vzdálenosti náhradní tloušťky  $\delta_*$ , která je definována jako:

(2.4)

$$\delta_* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v}{v_1}\right) dy$$

kde  $v$  [m/s] je rychlost v jakékoliv vzdálenosti  $y$  [m] od povrchu koryta a  $v_1$  [m/s] je rychlost na hranici mezní vrstvy. [8]



Obrázek 5 Rozdělení rychlosti podél hladkého povrchu [8]

Hodnota náhradní tloušťky se obecně liší, a to v rozmezí od 1/8 do 1/10 tloušťky mezní vrstvy v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla. [8]



### 2.4.2. Drsnost povrchu

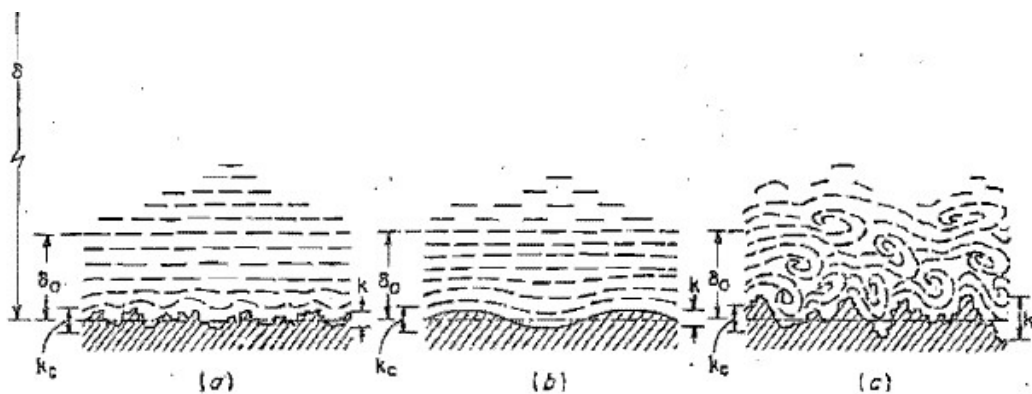
Jestliže povrch tělesa dostatečně přiblížíme, budeme schopni pozorovat povrch složený z nepravidelných vrcholů a údolí. Prvky tvořící tyto nepravidelnosti nazýváme hydraulická drsnost  $\Delta$  [m], popsána je jako ekvivalentní výška výstupků stěny. Poměr hydraulické drsnosti  $\Delta$  [m] a hydraulického poloměru  $R$  [m] je znám jako relativní drsnost. Pokud je velikost výběžku menší než velikost laminární podvrstvy, znamená to, že všechny nepravidelné výběžky budou tak malé, že budou zcela ponořeny v laminární podvrstvě, bude se tedy jednat o hydraulicky hladký povrch. Naopak o hydraulicky drsném povrchu hovoříme, pokud hydraulická drsnost bude větší, než kritická hodnota definována vzorcem (2.5). Výběžky budou dostatečně vysoké, aby se dostaly za laminární podvrstvu a narušily průběh kapaliny. [8] Vzorec pro výpočet kritické drsnosti:

(2.5)

$$k_c = \frac{5C}{\sqrt{g}} \cdot \frac{v}{\nu}$$

kde  $C$  je Chézyho koeficient [ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ ],  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  
 $v$  je rychlost [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] [8]

Na *Obrázku 6* můžeme vidět tři typy povrchu. V prvních dvou případech se tvoří laminární podvrstva a díky tomu kapalina není ovlivněna. Ve třetím případě se laminární podvrstva nevytvořila a dochází k turbulentnímu proudění.



Obrázek 6 Drsnosti povrchu (a) Hladký (b) Vlnitý (c) Drsný [8]

## 2.5. Manningův součinitel drsnosti $n$

Jedná se o nejrozšířenější a nejvíce používaný součinitel, který udává drsnost pro výpočet otevřeného proudění v korytě či v potrubí. Hlavní roli hraje ve výpočtu rychlostního součinitele  $C$  v Chézyho rovnici (2.6), kde rychlostní součinitel vypočítáme dle Manninga jako:

(2.6)

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}}$$

Pro určení součinitele se zdá být největším problémem jeho odhad. Přiřazujeme určitému typu povrchu jeho možnou drsnost jako jednu specifickou hodnotou, která má postihnout všechny charakteristické odpory koryta proti proudění. To může vnést do výpočtu lidský faktor. Proto je lepší tuto hodnotu podhodnocovat. Většinou se bere v úvahu pouze povrchová drsnost, ale není tomu tak. [8]

Povrchová drsnost je reprezentovaná výškou a tvarem zrn a výběžků na povrchu omočeného obvodu, která zapříčiní odpor vůči proudu. Jednoduše lze říci, pokud se jedná o jemná a malá zrna a výběžky, bude vliv na součinitel  $n$  malý. Pokud se bude jednat o výběžky ostrohranné a místo zrn se v korytě budou nacházet balvany, můžeme uvažovat vliv součinitele větší. [8]

Vegetaci lze považovat za typ povrchové drsnosti, ale na rozdíl od neživých materiálů může vegetace měnit svůj tvar v průběhu času. Důležitým faktorem je výška, hustota a její typ. Důležité je si uvědomit, že vegetace může během jednoho roku ovlivnit součinitel až dvojnásobně a měnit svou hodnotu během různých ročních období. [8]

Tvar koryta v sobě zahrnuje změny v průřezu a nepravidelnosti podél koryta. U přírodních koryt se jedná o usazeniny sedimentu na dně koryta, jako jsou tvořící se pískové vlny, nánosové lavice nebo hřebeny či úvaly. Dalším důležitým faktorem je zakřivení. Pokud se jedná o nepatrné zakřivení, můžeme uvažovat s menším součinitelem. Ostřejší tvary zakřivení mají větší vliv na charakteristický odpor proudění. V průběhu času mohou zakřivení působit na vymílání koryta a měnit jeho tvar. [8]

Překážky či objekty, které způsobí vzduť hladiny, mají znatelný vliv na součinitel. Míra tohoto vzduť závisí na velikosti a tvaru překážky. [8]

Další faktory jsou například nárůst a pokles hladiny, sezónní změny nebo splaveniny. Všechny výše uvedené faktory by měly být zahrnuty do součinitele drsnosti a přisuzovány podle stavu či stupně údržby. [8]

Pro všechny uvedené faktory se zdá být vhodné použít pro výpočet součinitele drsnosti vzorec dle Cowana:

(2.7)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

kde  $n_0$  charakterizuje materiál povrchu,  $n_1$  zohledňuje stupeň nerovností,  $n_2$  bere v potaz odlišnost příčných řezů,  $n_3$  vyjadřuje četnost překážek,  $n_4$  určuje vliv vegetace,  $m_5$  je korekční faktor zohledňující stupeň meandrování koryta. [8] Pro jednotlivé součinitele je popsán rozsah hodnot, které se liší v závislosti na stavu koryta. Tabulku popisující tyto součinitele najdeme na *Obrázku 7*.

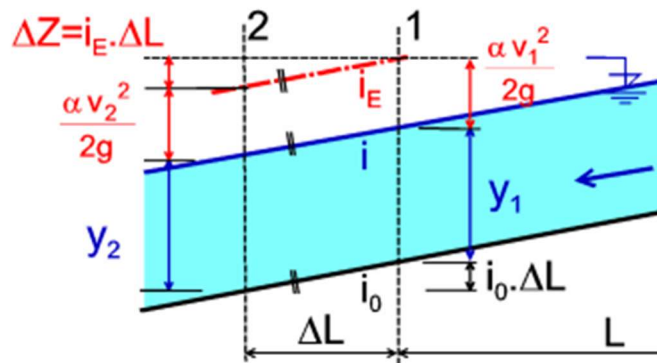
Channel conditions		Values	
Material involved	Earth	$n_0$	0.020
	Rock cut		0.025
	Fine gravel		0.024
	Coarse gravel		0.028
Degree of irregularity	Smooth	$n_1$	0.000
	Minor		0.005
	Moderate		0.010
	Severe		0.020
Variations of channel cross section	Gradual	$n_2$	0.000
	Alternating occasionally		0.005
	Alternating frequently		0.010-0.015
Relative effect of obstructions	Negligible	$n_3$	0.000
	Minor		0.010-0.015
	Appreciable		0.020-0.030
	Severe		0.040-0.060
Vegetation	Low	$n_4$	0.005-0.010
	Medium		0.010-0.025
	High		0.025-0.050
	Very high		0.050-0.100
Degree of meandering	Minor	$n_5$	1.000
	Appreciable		1.150
	Severe		1.300

Obrázek 7 Hodnoty pro drsnostní koeficient podle Cowana [8]

## 2.6. Ustálený rovnoměrný pohyb v otevřených korytech

Proudění dělíme na dva typy, jedním z nich je rovnoměrné, opačně pak nerovnoměrné. Za rovnoměrné, respektive ustálené proudění můžeme považovat proudění, které není na čas závislé, protože nerovnoměrné proudění se považuje za plynule se měnící, kde dochází ke změně tlaku v průběhu času. Popis proudění můžeme odvodit pomocí Bernoulliho rovnice. [2]

Dle *Obrázku 8* je pro rovnoměrné proudění charakteristický stálý průtok  $Q$ , průtočný průřez  $S$ , sklon dna  $i_0$  a shodná drsnost v celém korytě.



*Obrázek 8* Rovnoměrné ustálené proudění vody v korytě [9]

Následně můžeme říct, že sklon dna je roven sklonu hladiny a čáry energie, tedy:

$$i = i_0 = i_E = \frac{Zt}{l} \quad (2.8)$$

Z rovnice (2.8) vyplývá, že pro sklon určující rovnoměrné ustálené proudění je nezbytné překonání odporu třením  $Zt$  [2]

### 3. FOTOGRAMMETRIE

Pojem fotogrammetrie vznikl na základě složení tří řeckých slov *photos* – světlo, *gramma* – záznam, *metron* – měřit. Spojení těchto tří slov vzniklo ze snahy nazvat správným termínem činnost zabývající se měřením fotografických snímků. Díky snímkům jsme schopní ze 3D scény vytvořit 2D rovinu, která ztrácí informaci o vzdálenosti k objektu na snímku. Cílem fotogrammetrie je navrácení tohoto procesu zpět. [10]

Fotogrammetrii můžeme dělit dle polohy na:

1. Pozemní
2. Letecká
3. Družicové

Bezkontaktní určování objektových souřadnic se provozuje už přibližně 170 let, za tuto dobu prošla obrovským vývojem. V prvních letech hledala své uplatnění, zkoumaly se základy oboru a pořízené snímky sloužily pouze k průřezové metodě pozemní fotogrammetrii. Začátkem 20. století byla využívána letecká fotogrammetrie, která vedla k vytváření různých analogových přístrojů pro vyhodnocení snímků. S rozvojem výkonných počítačů fotogrammetrie přešla z analytické metody na metodu digitální, která přináší převratnou technologickou změnu. Vznikla tak družicová fotogrammetrie a technologie laserového skenování, které přineslo na 3D dokumentaci objektů nový pohled. [10]

#### 3.1. Metoda Structure From Motion (SFM)

SFM je poměrně mladá technika v oboru fotogrammetrie, její princip je založen na stereoskopické fotogrammetrii s kombinací metody průřezové fotogrammetrie. Tato metoda je založena na vytváření trojrozměrné struktury z dvojrozměrných snímků, které jsou spjaty s pohybem nosiče, respektive díky SFM jsme schopni za pomoci překrytí snímků vytvořit 3D model objektu. Od běžné metody se SFM liší převážně tím, že výpočty geometrie scény a pozice s orientací fotoaparátu jsou provedeny zcela automaticky. Principem je kombinace bodů ze snímků, které jsou pořízené z různých

míst. Díky korespondující informaci o pohybu kamery je vytvořena struktura scény. Předností metody je její efektivní a flexibilní přístup k zachycení složité topografie a příjemná cena. Negativní vlastností této metody jsou vysoké výpočetní nároky. [11]

### 3.2. Nalezení vhodné stěny pro žlab

Každá práce, studie či měření vyžaduje kvalitní podkladové materiály, které práci zajistí kvalitní úroveň. V případě tvoření 3D modelu z fotogrammetrie bylo zapotřebí si vytipovat vhodný povrch, který by mohl reprezentovat vodní koryto. Nejlepší variantou pro vytvoření modelu z fotogrammetrie je použít například stavbu, která byla už postavena. Taková varianta je vhodná například pro posouzení stávajícího stavu.

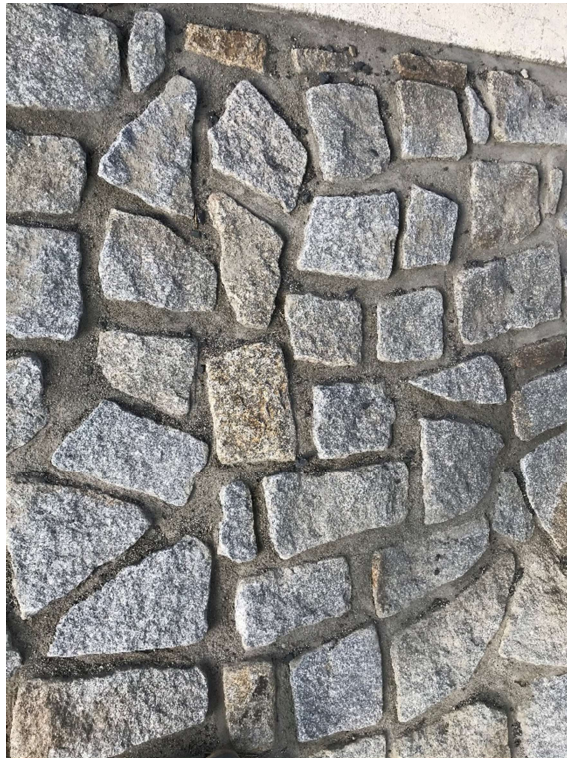
Pro vytvoření 3D modelu za pomoci fotogrammetrie bylo potřeba získat snímky vhodného typu obkladu, který by mohl reprezentovat umělé koryto. Bylo zapotřebí si nejdříve strukturu podkladu najít. Pro účely bakalářské práce byly vybrány různé druhy kamenných obkladů, několik z nich je zmíněno níže.

První vzorek byla kamenná stěna z opuky zobrazená na *Obrázku 9*, která na první pohled tvořila rovnou stěnu, a byla by tak vhodná k vytvoření rovných stěn. Kamenný obklad nakonec zvolen nebyl, jelikož tvary kamenů byly převážně rovné a nedocházelo by k velkým hydraulickým ztrátám.



*Obrázek 9 Kamenný obklad z opuky*

Druhým vzorkem pro vytvořené koryto byl kamenný obklad z lomové žuly, který měl vhodné výběžky jednotlivých kamenů a spáry měly dostatečnou tloušťku. Tento tvar by mohl znatelně ovlivnit hydraulickou drsnost, proto byl kamenný obklad zvolen jako vhodný. Viz *Obrázek 10*.

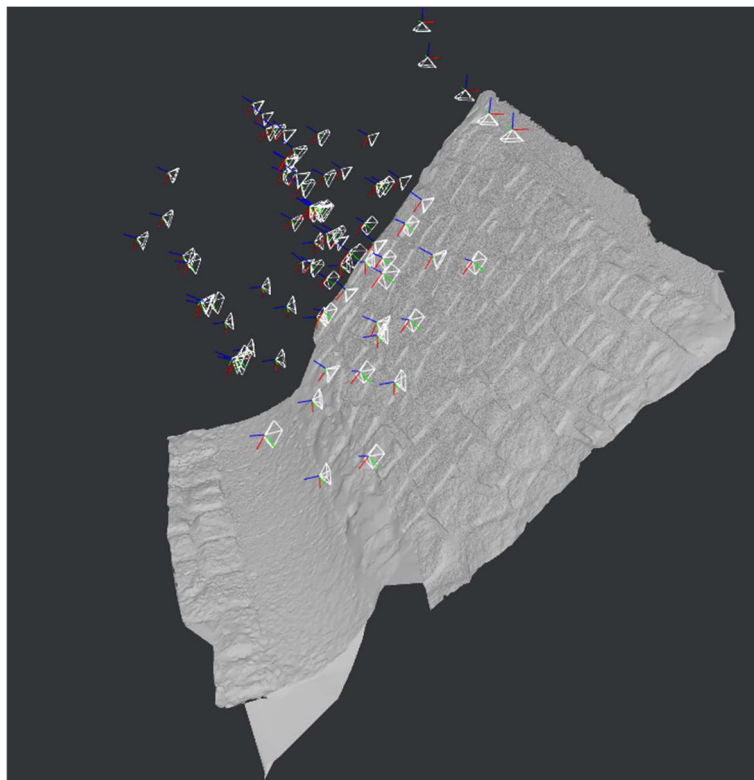


*Obrázek 10 Kamenný obklad lomové žuly*



### 3.3. Převedení stěny do 3D modelu

Pro vytvoření 3D modelu byl použit software Meshroom, jenž je distribuován jako open-source od společnosti AliceVision. Jeho výhodou je příjemné rozhraní a jednoduché použití.

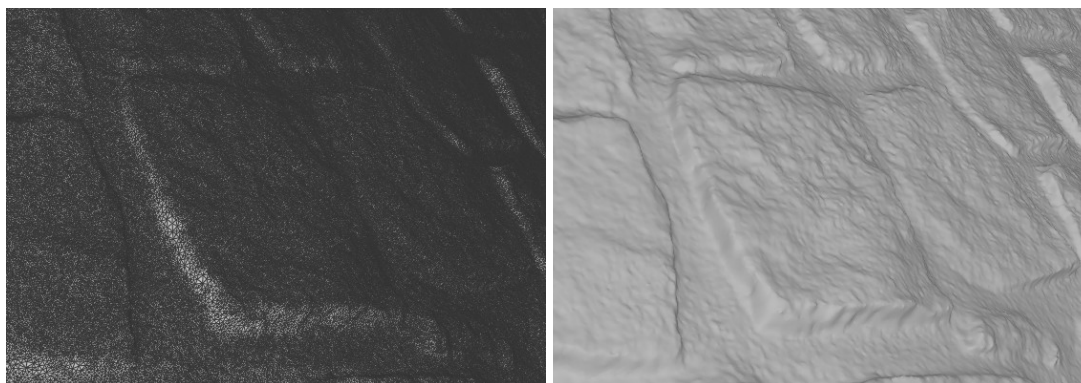


Obrázek 11 Zobrazení polohy fotoaparátu při pořizování snímku

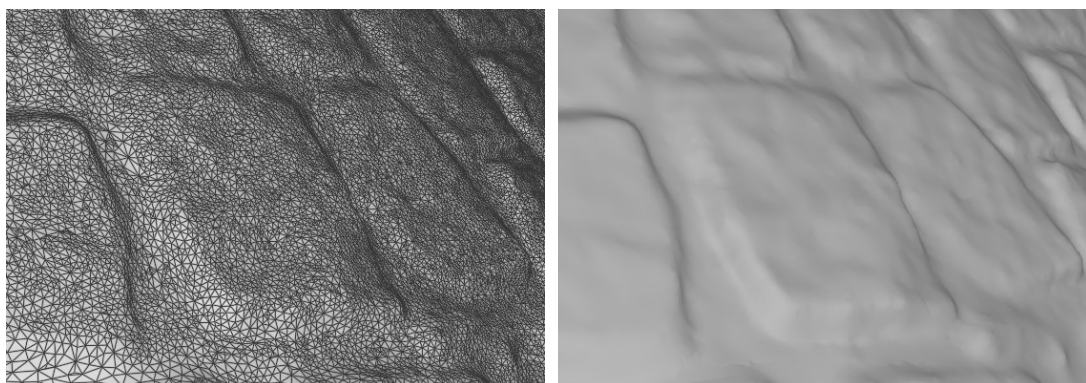
Do softwaru bylo importováno 76 snímků kamenného obkladu. Jednotlivé polohy vytvořených snímků jsou zobrazeny na *Obrázku 11*. Pro výsledný model byla vytvořena povrchová síť s celkovým počtem 3 199 215 uzlů, která je zobrazena na *Obrázku 12*. Síť tvořilo obrovské množství uzlů, které zajistily postihnutí všech nesrovnalostí na obkladu. Pokud by autor uvažoval s takto vytvořenou sítí, byl by celkový počet uzlů v řádu desítek miliónů uzlů. Vzhledem k úrovni výpočetní techniky nebylo možné s touto sítí pracovat.

Byl tedy vytvořen kompromis mezi kvalitou a účelem. Byla využita redukce sítě za pomoci funkce Depth Map, která umožnila snížení kvality snímků. Kvalitu bylo možné volit exponenciálně mezi hodnotami 1, 2, 4, 8 a 16. Hodnota 16 snížila kvalitu sítě radikálně na nepoužitelný model, naopak hodnota 4 obsahovala stále velký počet uzlů. Na *Obrázku 13* je zobrazena síť se zadanou hodnotou 8, která splňovala účel i kvalitu.

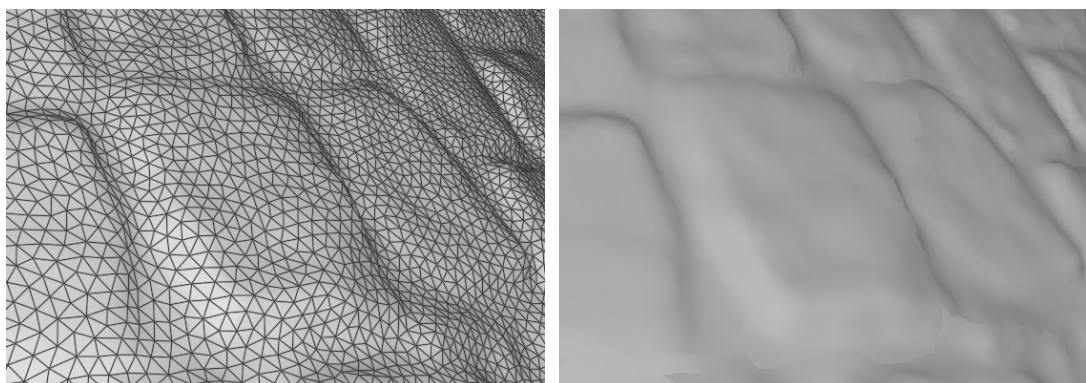
Takto vytvořenou síť by autor doporučil pro 3D modely, kde je potřeba přesnost v řádech milimetrů. V rámci bakalářské práce bylo potřeba vytvořit žlab o délce 20 metrů, k funkci Depth Map byla použita funkce MeshResampling, která zajistila další snížení uzlů při pokusu o udržení celkového tvaru. Funkci bylo možné volit v rozmezí hodnot 0 až 1. Pro tuto variantu byla použita hodnota 0,4. Výsledek je zobrazen na *Obrázku 14*. [12]



*Obrázek 12* Vysoce kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 3 199 215 uzlů



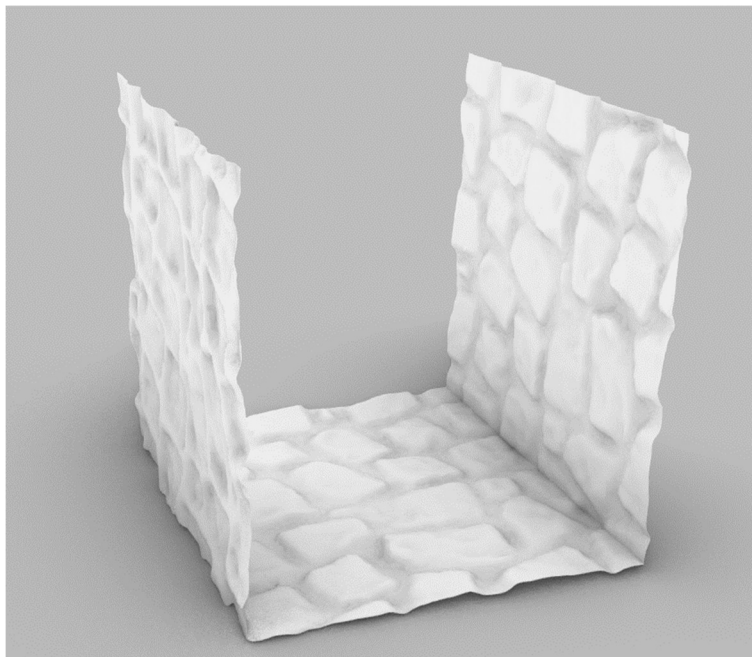
*Obrázek 13* Kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 187 869 uzlů



*Obrázek 14* kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 74 555 uzlů

### 3.4. Vytvoření umělého žlabu

Vytvořená redukovaná síť se bez další úpravy nedala využít pro účely práce a bylo nutné model upravit na požadovaný žlab. Průřez žlabu byl uvažován jako U profil o šířce a výšce 1 metr. K dosažení výsledného tvaru byl použit software Rhino 6, který umožnil dostatečnou práci s 3D modelem. Jako první bylo potřeba povrchovou síť uložit jako soubor s příponou .obj s následným otevřením v softwaru Rhino 6. V importované síti byla vybrána reprezentativní část, která tvořila dlaždici o rozměrech 1,2 x 1,2 m. Dlaždice byla od zbytku sítě oříznuta za pomoci funkce MeshTrim. Z výsledné dlaždice byly vytvořeny další dvě kopie, které po jednotlivém posunutí a pootočení tvořily U profil. Přesahy dlaždic byly oříznuty přes funkci MeshTrim a byl vytvořen U profil o šířce dna 1 m, výšce 1 m a délce 1,2 m. Výsledný model je zobrazen na *Obrázku 15*.



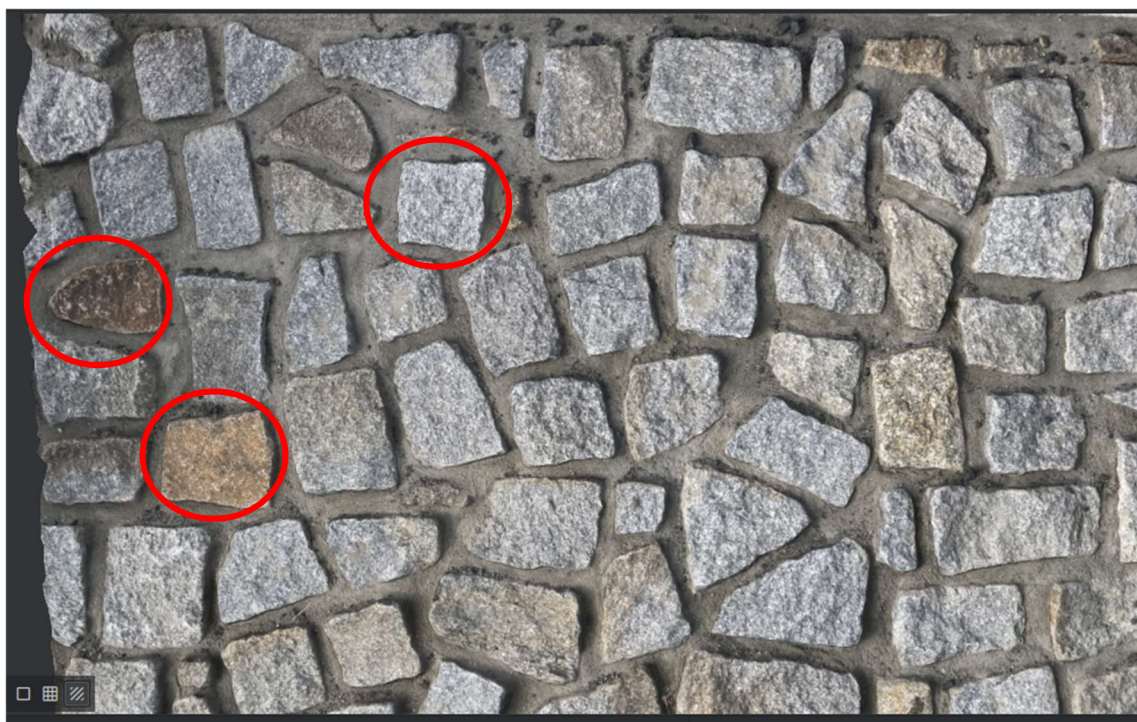
*Obrázek 15 U průřez žlabu o šířce a výšce 1 m*

Vytvořený 3D model byl vyexportován do softwaru ICEM CFD. Délka žlabu 1,2 m pro výpočet nestačila, a proto bylo potřeba model rozšířit. Bylo potřeba zajistit na obou koncích shodné hrany pro jednoduché kopírování na požadovanou délku 20 m. Žlab byl zrcadlen kolem osy x a byla vytvořena část o délce 2,4 m se shodnými konci, která byla následně jednoduše kopírována do požadované délky a přesahy byly vymazány.

### 3.5. Porovnání výsledků metody SFM



Obrázek 16 Snímek kamenného obkladu z lomové žuly



Obrázek 17 3D model ze softwaru Meshroom za pomoci metody SFM

## 4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

### 4.1. Computational Fluid Dynamics

Díky Computational Fluid Dynamics, zkráceně CFD, můžeme nahlédnout na svět jiným úhlem pohledu. CFD nám umožňuje vidět proudnice v tekutině, nebo ukázat, jak proudí krev v tepnách, či znázornit obtékání trupu a křidel letadla. CFD nám umožní simulovat jednotlivé problémy a najít vhodné řešení pro jejich minimalizaci. Jsme schopni kvalitně předvídat proudění kapalin za pomoci matematického modelování, respektive parciálními diferenciálními rovnicemi, matematickými metodami a výkonného softwaru. [13]

Parciální diferenciální rovnice představující zákony o zachování hybnosti, energie a zachování hmoty jsou řešeny v geometrické oblasti rozdělené na malé mřížky respektive výpočetní síť. Výpočetní síť tvořená konečným počtem buněk s jednotlivými charakteristickými vlastnostmi pro každou buňku, jako je tlak, teplota, bodová rychlost či hustota nám umožní předvídat proudění tekutiny kolem sítě, respektive objektu. CFD je založeno na principu Navierovo-Stokesovo rovnice, která vychází z druhého Newtonova zákona. [13]

V CFD se můžeme setkat s řešením úlohy s různými metodami, jako jsou:

1. Metoda konečných diferencí (FDM)
2. Metoda konečných objemů (FVM)
3. Metoda konečných elementů (FEM)

### 4.2. Metoda konečných objemů (FVM)

Metoda je založená na síti, která obsahuje ve své řešené oblasti konečný počet kontrolních objemů, které se navzájem nepřekrývají. Metoda slouží k převedení parciální diferenciální rovnice na soustavu algebraických rovnic pro konečný počet prvků, jejíž přenos informací probíhá přes stěny sítě. Jednotlivé uzly obsahují hodnoty složek jako jsou rychlosti, tlak, teplota a ostatní veličiny, které jsou obsazeny v geometrických středech konečných objemů. Hodnoty mezi jednotlivými objemy lze získat pomocí interpolace. Přenos hodnot složek probíhá přes hranice objemu a vypočítá se jako suma

integrálů přes jednotlivé stěny. Výsledek je soubor lineárních algebraických rovnic, jedna pro každý kontrolní objem. [14]

### **4.3. Vhodné použití CFD**

Metoda CFD nám umožní měřit charakteristické veličiny v různých částech průřezu, například tam, kam bychom se ve fyzikálním modelu těžce dostávali. Za pomoci CFD jsme schopni navrhnout více variant pro řešení problému a vybrat ten nejvhodnější. Není potřeba si pronajímat veliké prostory pro stavbu fyzikálního modelu či pronajímat větrný tunel. [13]

### **4.4. Řešič CFD úlohy – ANSYS CFX**

Software pro výpočetní dynamiku tekutin (CFD). Program byl vyvinut v 80. letech a jeho rozhraní se skládá z pěti složek. První dvě obsahují tvorbu modelu a jeho následného síťování, třetí složka nazvaná CFX-Pre slouží k zadávání okrajových podmínek modelu a nastavení optimálních fyzikálních vlastností pro správné fungování výpočtu. Pokud je model nastaven, je možno přejít na čtvrtou složku CFX-Solver, kde software začne s řešením úlohy se zadanými okrajovými podmínkami. Ve složce je důležité sledovat jednotlivá residua, jestli kapalina nevykazuje nějaké nesrovnalosti, které by mohly ovlivnit výsledek. Vhodné je sledovat také graf s imbalancí přítoku a odtoku z modelu. Pokud se nám výpočet ustálí, nebo dosáhne požadovaných iterací, získáme v poslední složce CFX-Post data, díky kterým můžeme vyhodnotit průběh kapaliny v modelu. V rozhraní máme možnost tvorby řezů a promítnutí jednotlivých veličin jako je rychlost, hloubka či tlak. Díky této složce máme možnost lépe prezentovat naše výsledky. [15]

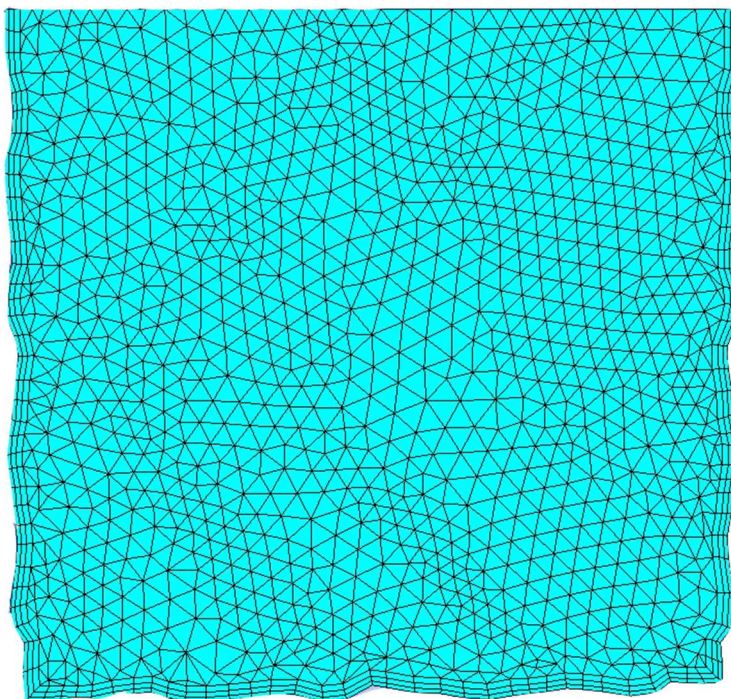
## 4.5. Nastavení matematického modelu

### 4.5.1. Výpočetní síť

Pro výpočet matematického modelu byla použita nestrukturovaná výpočetní síť Delaunay. Elementy výpočetní sítě byly ve tvaru čtyřstěnu. Díky tvaru bylo možné popsat strukturu kamenů při nižším celkovém počtu elementů.

Během práce byla vyzkoušena metoda strukturované sítě Blocking, kde pro popsání struktury kamenů byl potřeba větší počet elementů. Hlavní nevýhoda tohoto typu úlohy byl tvar elementů. Elementy ve tvaru krychlí si při stejném počtu prvků jako metoda Delaunay neporadily s popsáním struktury kamenů. Autor by metodu Blocking doporučil pro práci s rovinnými tvary.

Výpočetní síť je zobrazena na *Obrázku 18*, kde je znázorněno zahuštění sítě při velikosti elementů s délkou 32 mm. U stěn žlabu byla vytvořena jemnější síť o třech prizmatických vrstvách s celkovou výškou 22,9 mm pro správné zachycení proudění kolem kamenů.



*Obrázek 18 Řez sítě o velikosti elementu 32 mm*

#### 4.5.2. Nastavení vlastností modelu

Úlohu bylo potřeba řešit jako dvoufázové proudění vody a vzduchu. Pro matematický model bylo nastaveno tíhové zrychlení  $9,81 \text{ m/s}^2$  ve směru Z. Referenční tlak byl nastaven na hodnotu 1 atm. Převod tepla mezi kapalinami nebyl uvažován. Teplota vzduchu byla nastavena na hodnotu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a pro vodu  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.5.3. Počáteční podmínky

Pro simulaci volné hladiny bylo zapotřebí definovat okrajové a počáteční podmínky. Inspirací autorovi byla úloha 9. Free Surface Flow Over a Bump z literatury ANSYS CFX Tutorials. Pro nastavení vhodného tlaku a pole objemu kapalin (Volume fraction fields) bylo nutné zajistit hranice, kde docházelo k přelomu mezi kapalinou a vzduchem. Tedy nastavit hodnoty pro definici vzduchu a vody. Nad volnou hladinou bylo množství vzduchu ve výpočetním elementu definován hodnotou 1 a voda hodnotou 0. V opačném případě pod hladinou byl vzduch definován 0 a voda hodnotou 1. Při nastavení Volume fraction = 0,5 se jednalo o vykreslení volné hladiny. Dále bylo nutné stanovit výrazy pro správné fungování okrajových podmínek. Viz. *Tabulka 1*. [16]

*Tabulka 1 Seznam použitých výrazů pro zajištění správného fungování modelu*

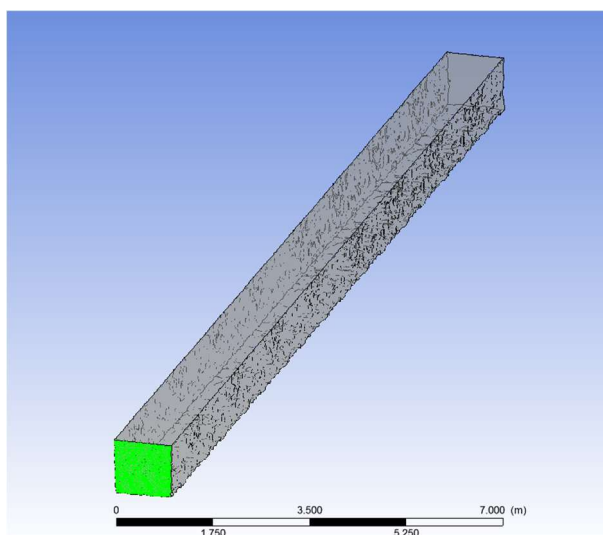
Název	Funkce	Definice
DenH	$(DenWater-DenRef)$	Relativní hustota vody (vztaženo k referenční hustotě)
DenRef	$1.185 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$	Hustota vzduchu
DenWater	$997 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$	Hustota vody
DownH	$0.65 \text{ [m]}$	Hloubka dolní hladiny
DownPres	$DenH * g * DownVFWater * (DownH - z)$	Hydrostatický tlak na dolní okrajové podmínce
DownVFAir	$step((z - DownH) / 1 \text{ [m]})$	Poloha vzduchu na dolní okrajové podmínce
DownVFWater	$1 - DownVFAir$	Poloha vody na dolní okrajové podmínce
UpH	$0.75 \text{ [m]}$	Hloubka horní hladiny
UpPres	$DenH * g * UpVFWater * (UpH - z)$	Hydrostatický tlak na horní okrajové podmínce
UpVFAir	$step((z - UpH) / 1 \text{ [m]})$	Poloha vzduchu na horní okrajové podmínce
UpVFWater	$1 - UpVFAir$	Poloha vody na horní okrajové podmínce



#### 4.5.4. Okrajové podmínky

##### INLET – Vtok

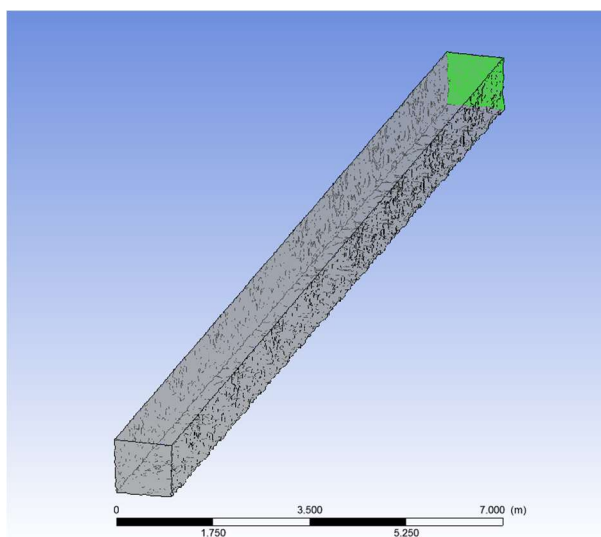
Okrajová podmínka Inlet – normal speed zajišťující pouze přítok kapaliny do modelu s definovanou rychlostí kapaliny a její vstupní hladinou  $UpH$  zajišťující správnou polohu vzduchu a kapaliny.



Obrázek 19 Zobrazení okrajové podmínky na modelu

##### OUTLET – Výtok

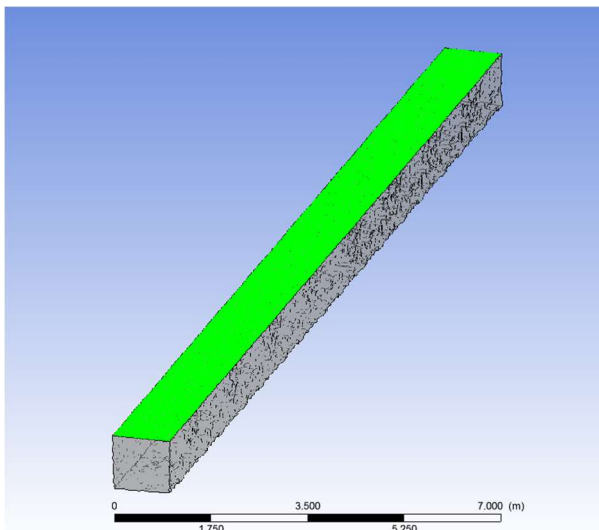
Okrajová podmínka Outlet – Static Pressure s definovaným relativním tlakem na výtoku zajistila, aby kapalina nevytékala do volného prostoru, ale byla zajištěná hydrostatickým trojúhelníkem. Nakonec byla doplněna výrazem  $DownH$  zajišťující hloubku dolní hladiny pro ustálené rovnoměrné proudění, tedy rovnoběžné se sklonem dna.



Obrázek 20 Zobrazení okrajové podmínky na modelu

## AIR – Vzduch

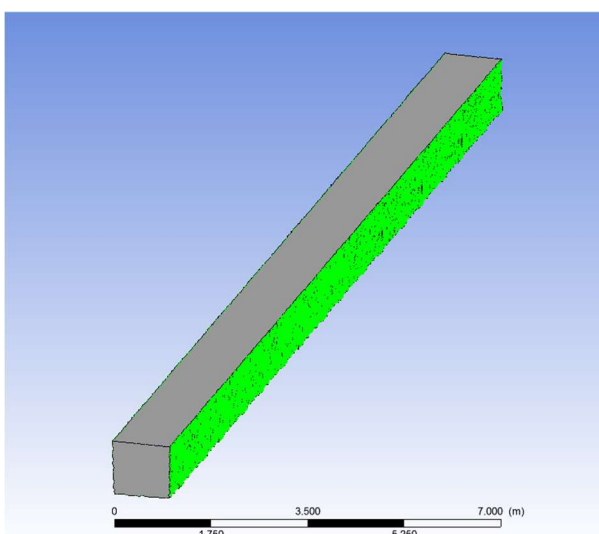
Opening – Opening Pressure simulující kontakt s atmosférou s definovaným relativním tlakem 0 kPa, podmínka umožňující kolísání hladiny a volného vstupu a výstupu vzduchu.



Obrázek 21 Zobrazení okrajové podmínky na modelu

## WALL – Stěny

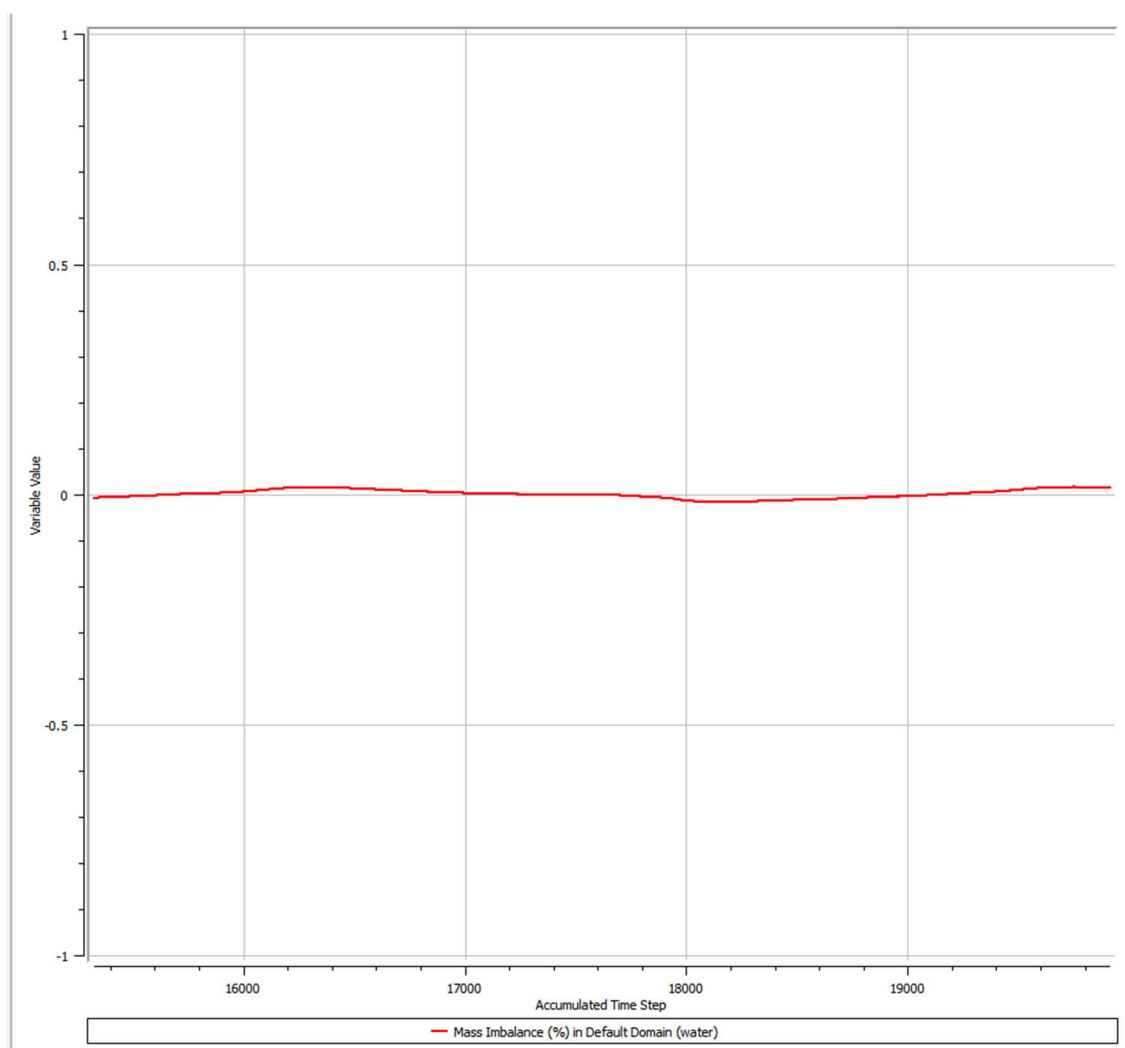
Stěny byly modelovány okrajovou podmínkou smooth wall. Při modelu s rovnou stěnou bylo nastavení specifikováno rough wall s hodnotou odpovídající velikosti průměrného pískového zrna.



Obrázek 22 Zobrazení okrajové podmínky na modelu

#### 4.5.5. Konvergence

Pro ověření správného fungování matematického modelu byl použit graf zobrazující rozdíl mezi přítokem a odtokem kapaliny z matematického modelu. Model lze považovat za ustálený, pokud je rozdíl mezi přítokem a odtokem kapaliny menší než 1 %. Na *Obrázku 23* je zobrazena rozkolísanost mezi vstupem a výstupem kapaliny z modelu, kde je patrné, že se jedná o ustálené proudění.



*Obrázek 23* Rozdíl mezi přítokem a odtokem [%]

## 4.6. Výpočet modelu z fotogrammetrie

### 4.6.1. Spuštění prvního výpočtu

Po nastavení fyzikálních parametrů a okrajových podmínek matematického modelu byl pro žlab s jednotlivými rozměry dle *Tabulky 2* spuštěn výpočet.

*Tabulka 2 Rozměry žlabu prvního modelu*

Délka L [m]	Šířka B [m]	Výška h [m]	Sklon i [%]
20,0	1,07	1,0	1,0

Vstupní hloubka hladiny byla nastavena na hodnotu 0,75 m, aby byl zajištěn dostatečný prostor pro rozkolísanost hladiny a nedocházelo k přelití vody přes stěny, a zároveň aby byla zajištěna platnost Manningova součinitele [9], který platí v rozmezí:

(4.1)

$$0,30 < R > 5,00 \text{ [m]}$$

Pro daný výpočet byla hodnota rovna  $R = 0,31 \text{ m}$ . Výstupní hloubka dolní hladiny byla nastavena na hodnotu 0,55 m, aby byl zajištěn 1,0 % sklon hladiny při délce 20 metrů. Do okrajové podmínky INLET byla vpouštěna voda o rychlosti 1,00 m/s až 2,60 m/s, to je přibližně rovno průtoku  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  až  $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$

Jednotlivé hladiny měřené při různých rychlostech byly následně vloženy do grafu, aby bylo možné porovnat výsledky a následně zjistit, jestli dojde k ustálenému proudění. Do grafu byla vložena hladina reprezentující hloubku ustáleného rovnoměrného proudění. Na *Obrázku 24* lze vidět, že na začátku žlabu vzniká veliký skok od požadované hladiny. Tento jev se pomalu ustaluje za pomoci zvýšení rychlosti přítoku kapaliny. Deficit byl způsoben nedostatkem vody ve žlabu, který se nebyl schopen při nízkých rychlostech plnit.

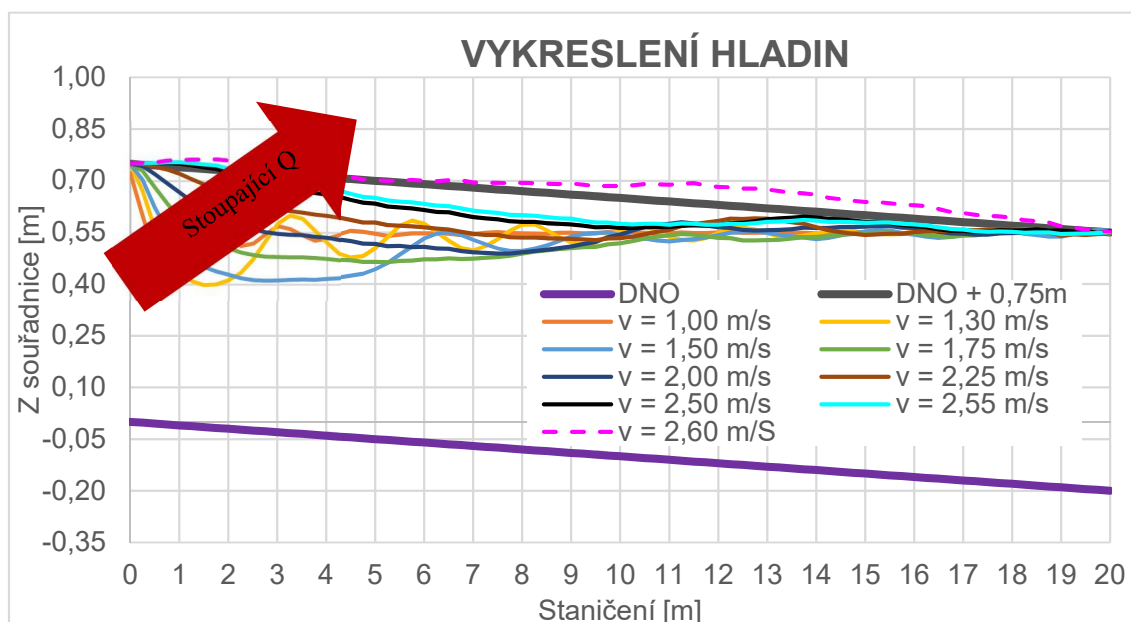
Po detailnějším pohledu na konec žlabu měla hladina tendenci se přibližovat k ustálenému proudění. Detail byl zobrazen na *Obrázku 25*. Po bližší analýze hladin blížících se k ustálení, respektive pro hodnoty  $v = 2,55 \text{ m/s}$  a  $v = 2,60 \text{ m/s}$ , se Froudeho číslo rovná v rozmezí 0,9-1,0, dle výpočtu Froudeho čísla:

(4.2)

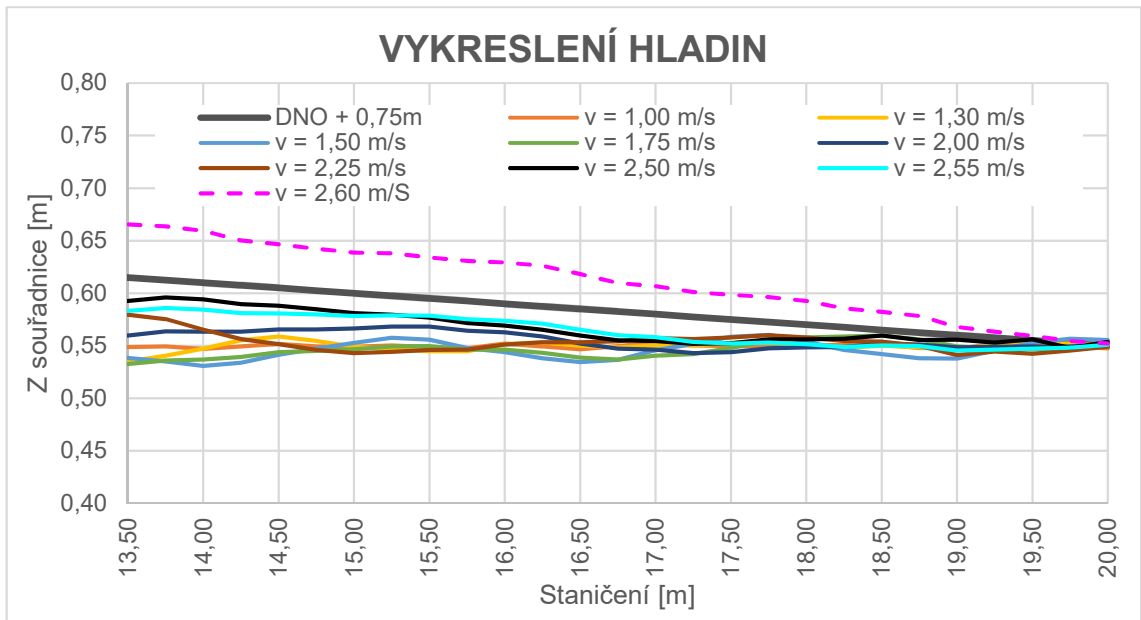
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y_s}}$$

kde  $v$  je střední průřezová rychlost proudění,  $g$  gravitační zrychlení,  $y_s$  střední hloubka. Pokud  $Fr < 1$ , je roven říčnímu proudění, při  $Fr > 1$  je rovno bystrinnému proudění a v případě  $Fr = 1$  je rovno kritickému proudění.

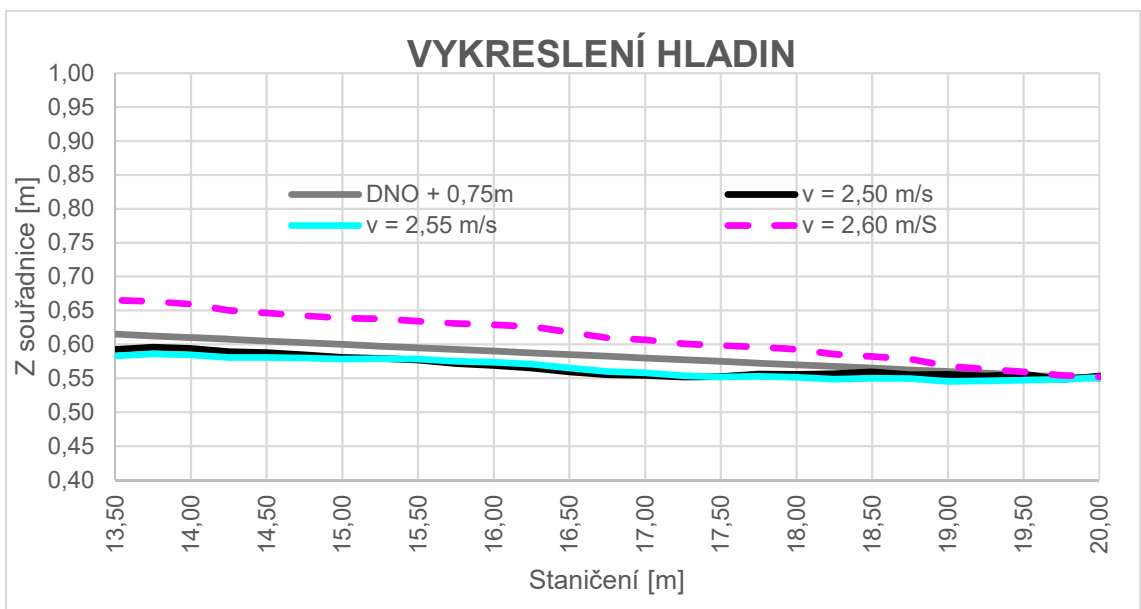
Lze tedy říci, že se jedná o kritické proudění, tedy přechod mezi říčním a bystrinným prouděním. Nebylo proto možné tyto výsledky brát jako akceptovatelné.



Obrázek 24 Vykreslení hladin v celém staničení



Obrázek 25 Vykreslení hladin ve staničení 13,50 – 20,0 m

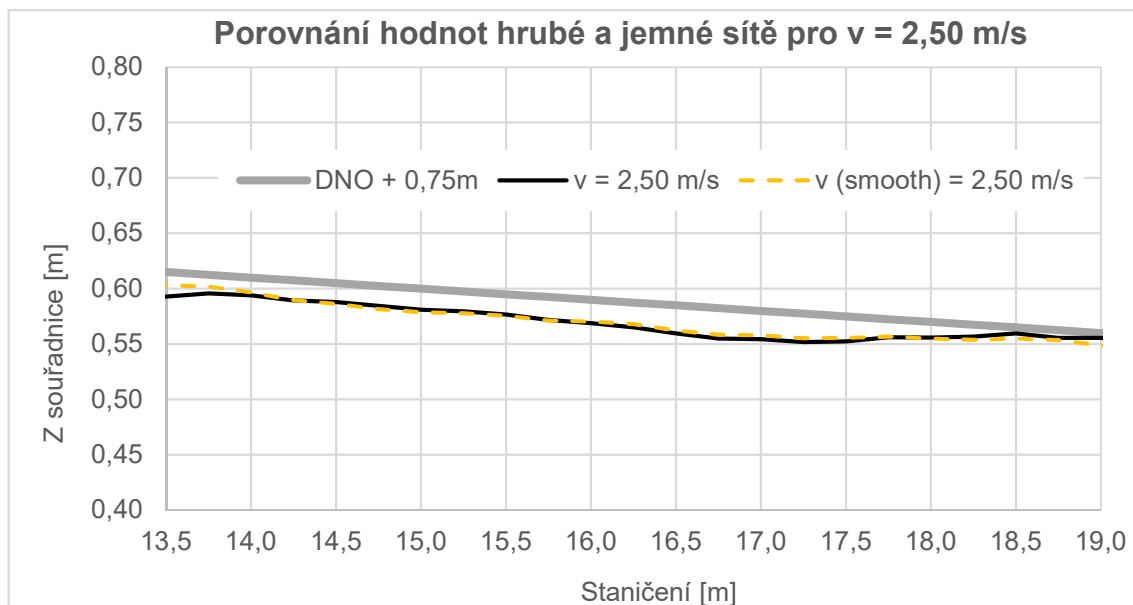


Obrázek 26 Vykreslení vybraných hladin ve staničení 13,50 – 20,0 m

#### 4.6.2. Korekce výpočetní sítě

Pro výpočet modelu byla použita nestrukturovaná výpočetní síť vytvořená ze čtyřstěnu. Pro výpočet v softwaru Ansys CFX byla nejdříve použita síť s délkou elementu 64 mm. Na této síti byly provedeny všechny výpočty. Z jednotlivých výpočtů byla stanovena výsledná data, která následně byla vyzkoušena na síti o velikosti elementu 32 mm. V měřeném úseku se na výpočtech neobjevila výrazná nesrovnalost. Proto byly brány výsledky s hrubší sítí jako akceptovatelné. Jemnější síť o velikosti délky uzlů 16 mm a níže nebyla vyzkoušena, jelikož školní licence pro program Ansys CFX umožňuje maximálně 512 000 uzlů na model a vznikl by tak problém s délkou výpočtu.

Kvalita výpočetní sítě u stěny žlabu pro zajištění prizmatické vrstvy byla při obou výpočtech zachována, aby bylo zajištěno správné obtékání struktury stěny vodou.



Obrázek 27 Porovnání vlivu sítě na výpočet

### 4.6.3. Korekce výpočtu

Po předešlém výpočtu bylo potřeba snížit Froudeho číslo, které bylo přibližně rovno hodnotě 1. Jelikož Froudeho číslo závisí na střední průřezové rychlosti  $v$  a střední hloubce  $y_s$ . Byl změněn sklon dna na 0,5 %, aby se snížily průřezové rychlosti, jelikož snížení hloubky hladiny by znamenalo neplatnost Manningova součinitele, které platí v rozmezí 0,3 – 5,0 metru. Rozměry žlabu jsou napsané v *Tabulce 3*.

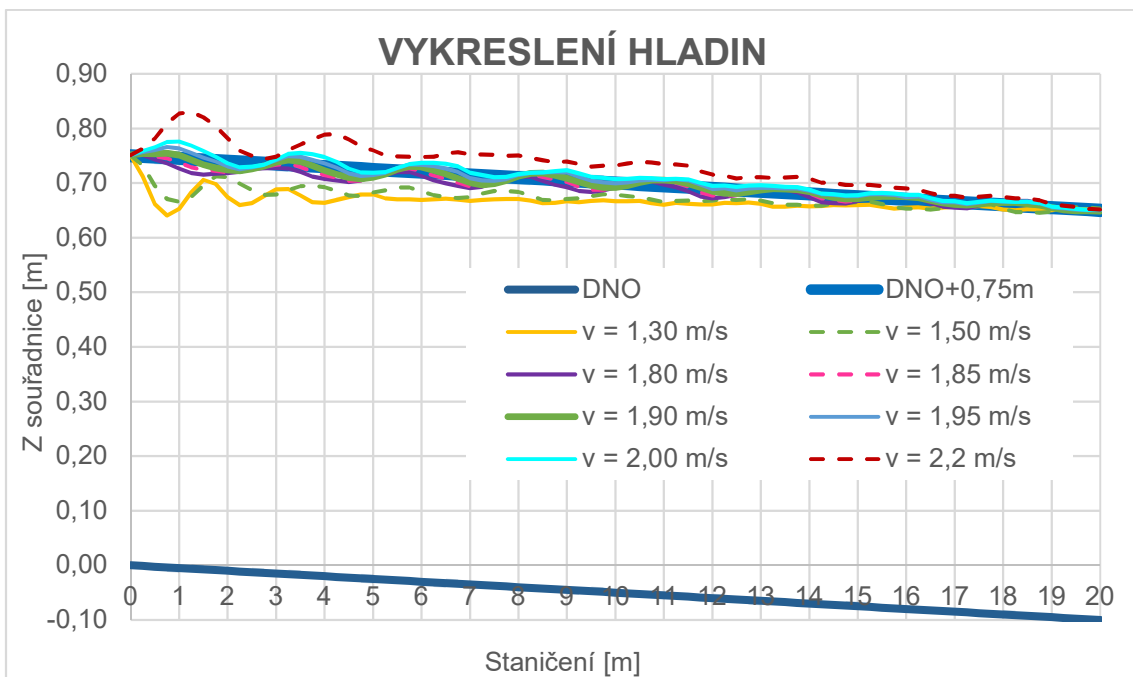
*Tabulka 3 Rozměry žlabu druhého modelu*

Délka L [m]	Šířka B [m]	Výška h [m]	Sklon i [%]
20,0	1,07	1,0	0,5

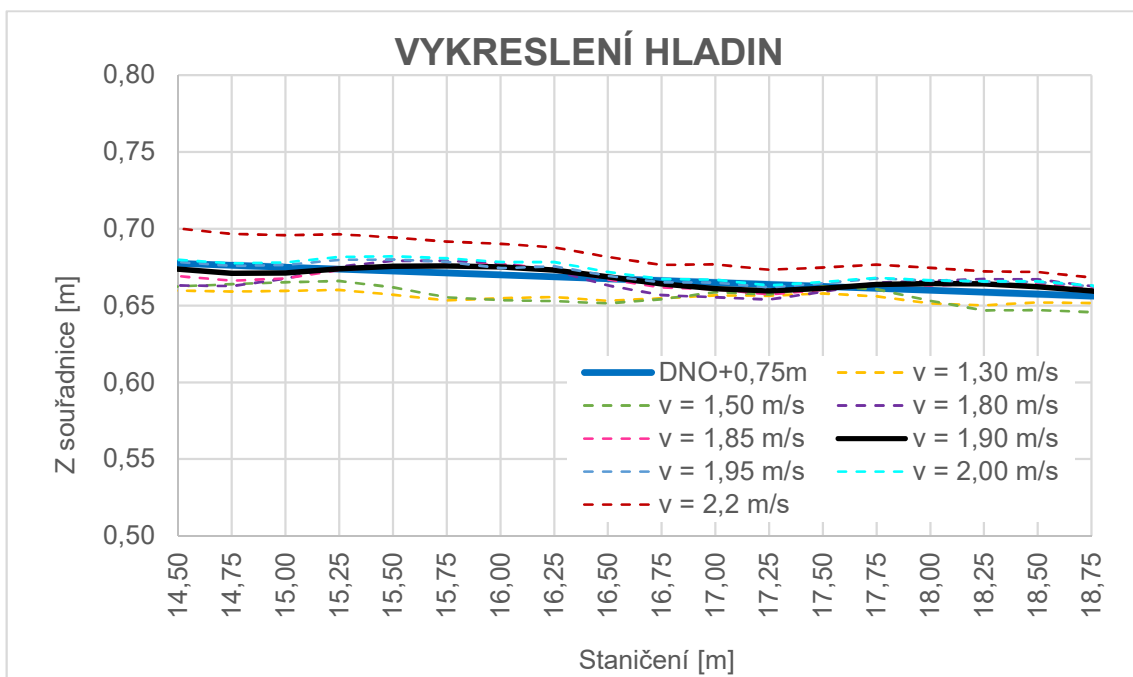
Vstupní hloubka hladiny byla nastavena na hodnotu 0,75 m, aby byl zajištěn dostatečný prostor pro rozkolísanost hladiny a nedocházelo k přelití vody přes stěny, a zároveň aby byla zajištěna platnost Manningova součinitele. Výstupní hloubka dolní hladiny byla nastavena na hodnotu 0,65 m, aby byl zajištěn 0,5 % sklon hladiny při délce 20 metrů. Do okrajové podmínky INLET byla vpouštěna voda o rychlosti 1,30 m/s až 2,20 m/s, to je přibližně rovno 1,0 m<sup>3</sup>/s až 1,8 m<sup>3</sup>/s

Jednotlivé měřené hladiny při různých rychlostech byly následně vloženy do grafu, aby bylo možné porovnat výsledky a následně zjistit, jestli dojde k ustálenému proudění. Do grafu byla vložena hladina reprezentující hloubku ustáleného rovnoměrného proudění. Následně byl graf zobrazen na *Obrázku 28*, kde deficit hladiny na začátku žlabu není tak výrazný jako ve výpočtu předešlém. Na první pohled se jedná o hladiny ustálenější. Froudeho číslo bylo v rozmezí 0,5 – 0,7 a splňovalo podmínku říčního proudění. Na *Obrázku 29* je zobrazen detail ustáleného úseku a na *Obrázku 30* je vykreslena výsledná hladina blížící se k hladině požadované.

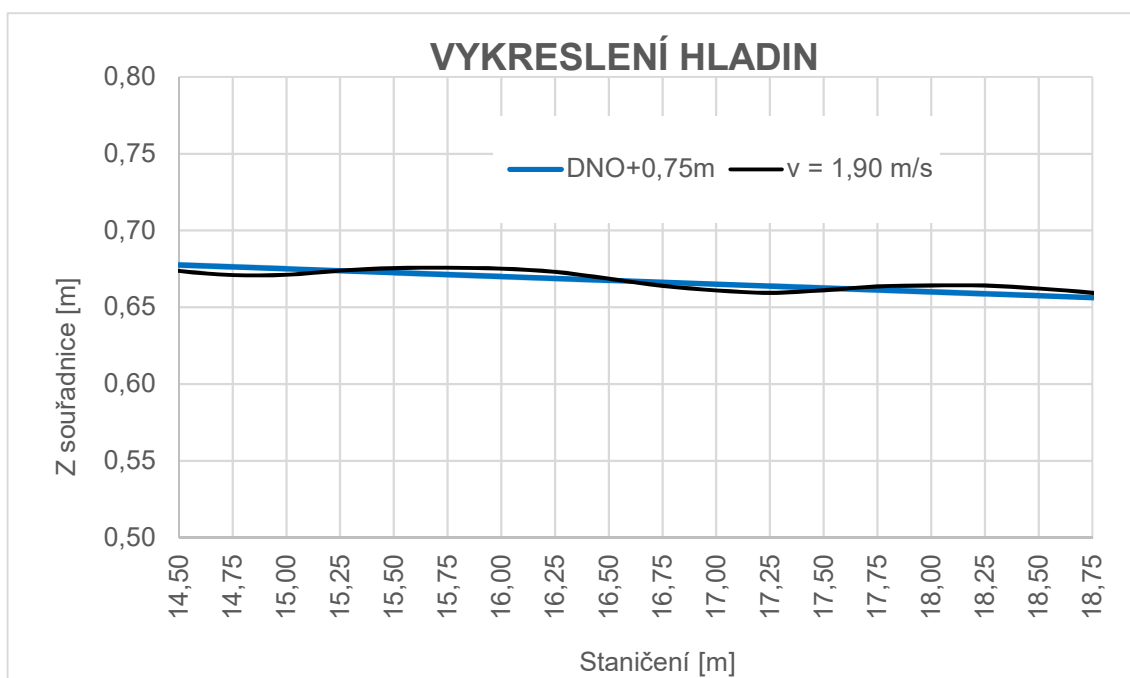




Obrázek 28 Vykreslení hladin v celém staničení



Obrázek 29 Vykreslení hladin ve staničení 14,50 – 18,75 m



Obrázek 30 Vykreslení výsledné hladiny ve staničení 14,50 – 18,75 m

Za rovnoměrné ustálené proudění byla stanovena hladina při vstupní rychlosti 1,90 m/s. Stanovení rovnoměrného proudění bylo stanoveno na základě *Tabulky 4*, kde byly zobrazeny jednotlivé hladiny s rozkolísaností ve vybraném úseku od staničení 14,50 – 18,75 m.

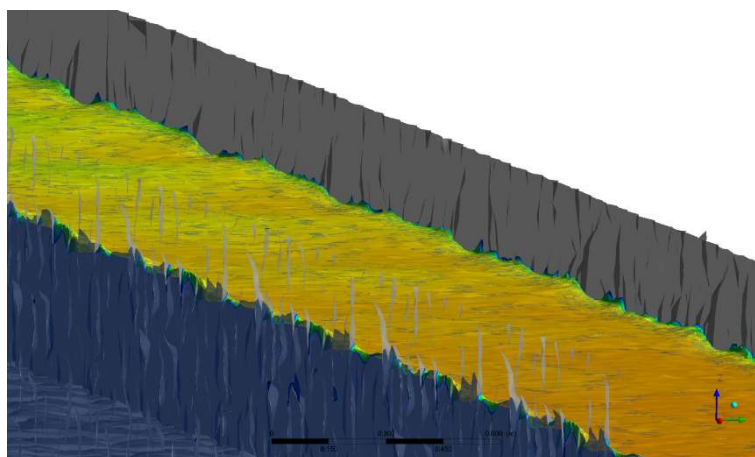
Při nižších rychlostech hladina teprve dosahovala potřebné teoretické výšky. V tabulce níže je možné vidět rozdíl mezi hloubkami v řezech. K ustálení docházelo v rychlosti kolem 1,80 m/s, kde rozdíl hloubek v řezech byl přibližně v řádu centimetrů. Rozkolísanost hladiny klesala až do vstupní rychlosti 1,90 m/s, kdy se pohybovala v rádech milimetrů a následně, po zvýšení této rychlosti, se hladina začala více vlnit, a to až do rychlosti 2,20 m/s.

Tab. 4 Zobrazení rozkolísanosti hladin v ustáleném úseku

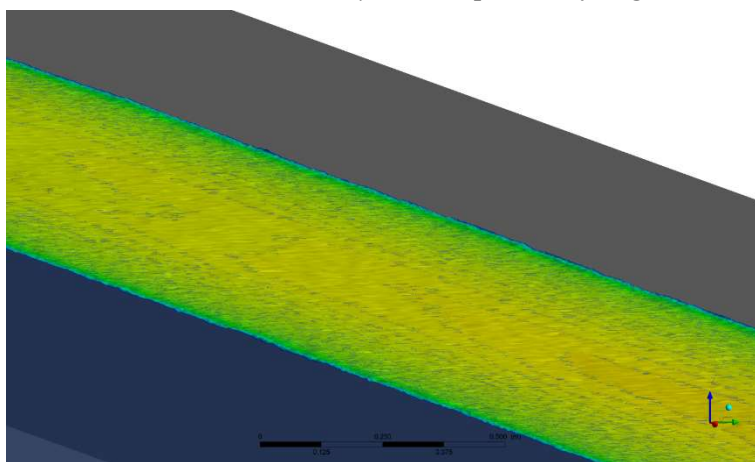
INLET NORMAL SPEED		1,30 m/s	1,50 m/s	1,80 m/s	1,85 m/s	1,90 m/s	1,95 m/s	2,00 m/s	2,20 m/s
Staničení dle souř. X [m]	Požadovaná hloubka [m]	Hloubky [m]							
14,50	0,75	0,732	0,735	0,736	0,742	0,746	0,751	0,752	0,773
14,75	0,75	0,733	0,738	0,736	0,740	0,745	0,750	0,751	0,770
15,00	0,75	0,735	0,740	0,742	0,743	0,746	0,751	0,753	0,771
15,25	0,75	0,736	0,742	0,752	0,749	0,750	0,756	0,758	0,773
15,50	0,75	0,735	0,739	0,757	0,753	0,753	0,757	0,760	0,772
15,75	0,75	0,732	0,734	0,758	0,755	0,755	0,757	0,760	0,770
16,00	0,75	0,735	0,734	0,758	0,757	0,755	0,754	0,758	0,770
16,25	0,75	0,737	0,734	0,754	0,756	0,754	0,757	0,760	0,769
16,50	0,75	0,736	0,734	0,746	0,750	0,751	0,752	0,754	0,764
16,75	0,75	0,738	0,738	0,741	0,746	0,748	0,749	0,751	0,760
17,00	0,75	0,742	0,744	0,740	0,746	0,746	0,750	0,752	0,762
17,25	0,75	0,743	0,743	0,740	0,744	0,746	0,748	0,749	0,760
17,50	0,75	0,745	0,750	0,746	0,748	0,749	0,752	0,753	0,762
17,75	0,75	0,745	0,749	0,754	0,753	0,752	0,756	0,757	0,765
18,00	0,75	0,741	0,743	0,756	0,753	0,754	0,756	0,756	0,764
18,25	0,75	0,741	0,738	0,758	0,755	0,755	0,757	0,757	0,764
18,50	0,75	0,745	0,739	0,760	0,757	0,755	0,758	0,758	0,764
18,75	0,75	0,745	0,739	0,756	0,755	0,753	0,756	0,757	0,762

#### 4.6.4. Vlnění hladiny

Ve výsledcích se objevuje vlnění hladiny, které nelze úplně potlačit, jelikož do výpočtu byla vnesena periodičita z 3D modelu. Problém byl zobrazen v *Tabulce 5*, kde byly zvýrazněny jednotlivé úseky po 2,4 metrů z kterých se model tvořil. V tabulce pro jednotlivé veličiny byla zobrazena barevná škála. Na začátku a na konci jednotlivých úseků byla hodnota hladiny vždy větší než hodnota uprostřed. To bylo způsobeno zrcadlením, aby byly na koncích zajištěny stejné hrany pro jednoduché kopírování do výsledné délky žlabu viz. *kapitola 3.4*. Jelikož se jednalo o model z fotogrammetrie, nešlo zaručit stejně vysoké výběžky v celém žlabu a vznikal tak problém s rozkolísaností hladiny, kdy při větších výběžcích byla menší průtočná plocha a hladina vzrostla. Naopak při menších výběžcích byla průtočná plocha větší a hladina klesla, ve výsledku pak tento jev způsoboval kmitání hladiny.



Obrázek 31 Zobrazení hladiny u stěn s použitím fotogrammetrie



Obrázek 32 Zobrazení hladiny u stěn s rovnou stěnou

Tabulka 5 Zobrazení vlivu fotogrammetrie na vlnění modelu

INLET Normal speed 1,90 m/s						
Staničení X	Obsah	Z. souř. hladiny	Rychlost	Hloubka	Průtok	
[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m/s]	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	
≈2,4 m	<b>11,25</b>	<b>0,800</b>	<b>0,704</b>	<b>1,93</b>	<b>0,760</b>	<b>1,547</b>
	11,5	0,806	0,699	1,92	0,756	1,549
	11,75	0,805	0,692	1,93	0,751	1,551
	12	0,809	0,685	1,92	0,745	1,551
	12,25	0,786	0,681	1,97	0,743	1,549
	12,5	0,800	0,681	1,94	0,743	1,550
	12,75	0,795	0,684	1,95	0,748	1,550
	13	0,796	0,687	1,95	0,752	1,548
	13,25	0,816	0,689	1,90	0,756	1,553
	13,5	0,813	0,689	1,90	0,756	1,549
≈2,4 m	<b>13,75</b>	<b>0,806</b>	<b>0,688</b>	<b>1,92</b>	<b>0,757</b>	<b>1,551</b>
	14	0,802	0,684	1,93	0,754	1,547
	14,25	0,816	0,678	1,90	0,749	1,551
	14,5	0,798	0,674	1,94	0,746	1,546
	14,75	0,811	0,671	1,91	0,745	1,553
	15	0,810	0,671	1,91	0,746	1,548
	15,25	0,801	0,674	1,93	0,750	1,550
	15,5	0,800	0,676	1,93	0,753	1,548
	15,75	0,809	0,676	1,91	0,755	1,548
	16	0,806	0,675	1,92	0,755	1,546
≈2,4 m	<b>16,25</b>	<b>0,803</b>	<b>0,673</b>	<b>1,93</b>	<b>0,754</b>	<b>1,549</b>
	16,5	0,800	0,669	1,93	0,751	1,548
	16,75	0,804	0,664	1,93	0,748	1,549
	17	0,793	0,661	1,96	0,746	1,550
	17,25	0,803	0,659	1,93	0,746	1,547
	17,5	0,800	0,661	1,94	0,749	1,549
	17,75	0,802	0,664	1,93	0,752	1,549
	18	0,803	0,664	1,93	0,754	1,551
	18,25	0,807	0,664	1,92	0,755	1,547
	18,5	0,802	0,662	1,93	0,755	1,549
<b>18,75</b>	<b>0,804</b>	<b>0,659</b>	<b>1,93</b>	<b>0,753</b>	<b>1,549</b>	

#### 4.6.5. Ověření rovnoměrného ustáleného proudění

Za rovnoměrné ustálené proudění můžeme považovat proudění, které není na čas závislé, protože nerovnoměrné proudění se považuje za plynule se měnící, kde dochází ke změně tlaku za čas. Popis proudění za pomoci diferenciální rovnice můžeme odvodit pomocí Bernoulliho rovnice. [2] Pro rovnoměrné proudění je charakteristický stálý průtok  $Q$ , průtočný průřez  $S$ , sklon dna  $i_0$  a shodná drsnost v celém korytě. [9] Proto bylo potřeba na výsledné hladině zjistit, jestli platí podmínka:

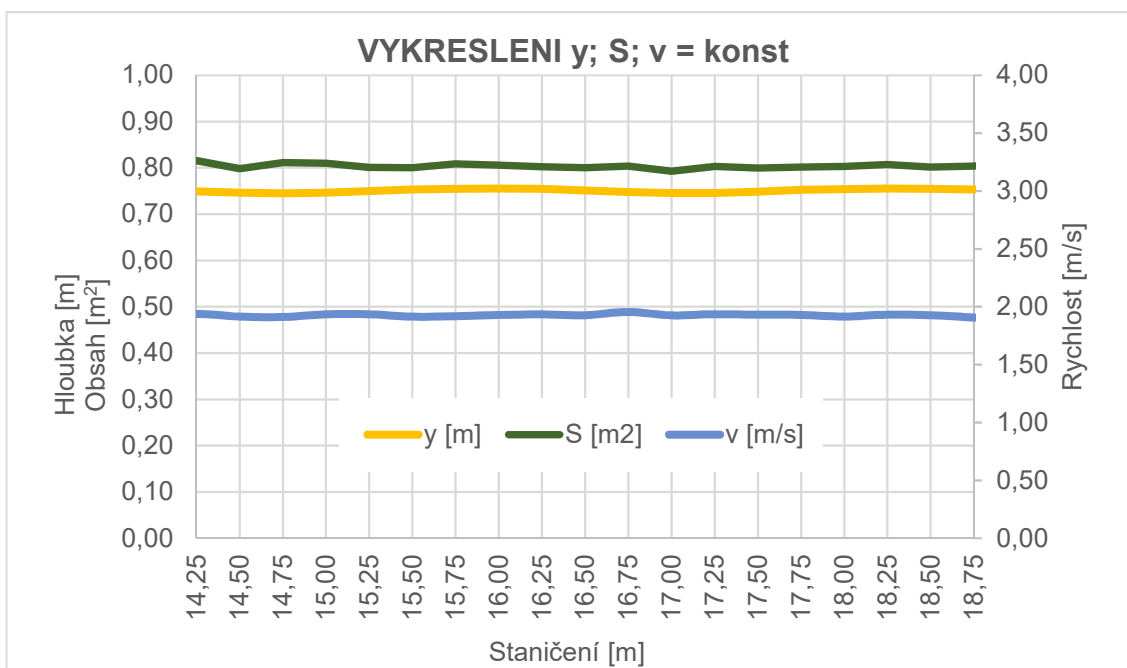
(4.3)

$$S; y; v = konst$$

(4.4)

$$i = i_0 = i_E$$

Aby bylo možné ověřit tyto podmínky, byly do grafu vloženy hodnoty obsahu, hloubky a rychlosti z jednotlivých staničení. Hodnoty lze uvažovat jako konstantní, ačkoliv z *Tabulky 5* bylo patrné, že obsah a rychlost v průřezu byly závislé na tvaru výběžků, jelikož výběžky nemají totožný tvar v celém úseku.



Obrázek 33 Graf vykreslující ověření podmínky  $S; y; v = konst$

S ohledem na typ úlohy autor tvrdí, že se jedná o ustálené rovnoměrné proudění, které splňuje, že obsah, hloubka a rychlost je v úseku 14,50 – 18,75 m konstantní.

#### 4.6.6. Vyhodnocení drsnostního součinitele

Pro výpočet Manningova drsnostního součinitele byla použita Chézyho rovnice:

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (4.5)$$

Respektive:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}} \cdot S \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (4.6)$$

Pro dosazení do rovnice byly použity průměrné hodnoty z ustáleného úseku. Dle Tab. 6

Tabulka 6 Hodnoty rovnoměrně ustáleného proudění

STANIČENÍ [m]	Hloubka [m]	S [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	B [m]
14,50	0,75	0,80	1,94	1,55	1,07
14,75	0,74	0,81	1,91	1,55	1,09
15,00	0,75	0,81	1,91	1,55	1,09
15,25	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
15,50	0,75	0,80	1,93	1,55	1,06
15,75	0,75	0,81	1,91	1,55	1,07
16,00	0,76	0,81	1,92	1,55	1,07
16,25	0,75	0,80	1,93	1,55	1,06
16,50	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
16,75	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
17,00	0,75	0,79	1,96	1,55	1,06
17,25	0,75	0,80	1,93	1,55	1,08
17,50	0,75	0,80	1,94	1,55	1,07
17,75	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
18,00	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
18,25	0,76	0,81	1,92	1,55	1,07
18,50	0,75	0,80	1,93	1,55	1,06
18,75	0,75	0,80	1,93	1,55	1,07
<b>Průměr</b>	<b>0,75</b>	<b>0,80</b>	<b>1,93</b>	<b>1,55</b>	<b>1,07</b>

Po dosazení do rovnice vyšla rovnost:

$$1,55 = \frac{1}{0,017} \cdot R^{\frac{1}{6}} \cdot 0,80 \cdot \sqrt{0,312 \cdot 0,005} \quad (4.7)$$

Díky Chézyho rovnici bylo možné stanovit hydraulickou drsnost obkladu hodnotou:

$$n = 0,017 \quad (4.8)$$

Dle tabulek Manningova drsnostního součinitele, autor tento specifický obklad přirovnal ke kamennému opevnění s vylitím spár cementovou maltou, který je stanoven v rozsahu hodnot.

$$n = 0,017 - 0,030 \quad (4.9)$$

### Citlivostní analýza

V rámci citlivostní analýzy byla provedena kontrola Manningova drsnostního součinitele. V měřeném úseku 14,50 – 18,75 metru vzniká vlnění hladiny způsobené rozdílnou výškou výběžků. Z minimální a maximální možné hloubky hladiny byla stanovena možná rozdílná hladina, která kolísá v rozmezí 0,25 cm. Pro hladinu menší, respektive větší o 0,25 cm byla následně dopočítána hodnota  $n$  pro ověření správnosti drsnostního součinitele. V *Tabulce 7* jsou hodnoty pro výpočet průměrných hodnot.

*Tabulka 7 Výpočet hydraulické drsnosti z průměrných hodnot*

[-]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]	n
i	b	h	S	O	R	C	v	Q	Fr	
0,005	1,070	0,751	0,80	2,57	0,312	48,80	1,929	1,550	0,71	0,01688

*Tabulka 8 Výpočet hydraulické drsnosti se zvýšenou hladinou*

[-]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]	n
l	b	h	S	O	R	C	v	Q	Fr	
0,005	1,070	0,754	0,81	2,58	0,313	48,61	1,922	1,550	0,71	0,01695

*Tabulka 9 Výpočet hydraulické drsnosti se sníženou hladinou*

[-]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[-]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]	n
l	b	h	S	O	R	C	v	Q	Fr	
0,005	1,070	0,749	0,80	2,57	0,312	49,00	1,935	1,550	0,71	0,01681



V *Tabulce 8* se průměrná hladina zvedla o 0,25 cm a hodnota  $n$  se zvedla o  $7e^{-5}$ , respektive o 0,00007. V *Tabulce 9* se průměrná hladina snížila o 0,25 cm a hodnota  $n$  klesla o  $7e^{-5}$ . Rozkolísanost hladiny v rozmezí 0,25 cm tedy nemá znatelný vliv na změnu hydraulické drsnosti.

#### 4.6.7. Ověření čáry energie

Pro ověření podmínky z rovnice (4.4) bylo potřeba získat hodnotu čáry energie, která byla pro rovnoměrné proudění získána z Bernoulliho rovnice viz *Obrázku 8*:

$$\Delta z = i_0 \cdot \Delta L + (y_1 - y_2) + \frac{\alpha \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2g} \quad (4.10)$$

kde  $\Delta z$  charakterizuje ztráty,  $i_0$  sklon dna žlabu,  $y$  značí hloubky v jednotlivých úsecích,  $\alpha$  Coriolisovo číslo,  $v$  rychlost v jednotlivých úsecích a  $g$  tíhové zrychlení. Jedinou neznámou bylo Coriolisovo číslo, které bylo spočteno dle Mozorova kde:

$$\alpha = 1 + 0,84 \cdot \left( \frac{3,7}{C^{\frac{1}{4}}} - 1 \right)^{1,8} \quad (4.11)$$

Kde  $C$  je rychlostní součinitel:

$$\alpha = 1 + 0,84 \cdot \left( \frac{3,7}{48,79^{\frac{1}{4}}} - 1 \right)^{1,8} \quad (4.12)$$

$$\alpha = 1,16$$

Pro výpočet sklonu hladiny byly uvažovány průměrné hodnoty hladiny, aby bylo zamezeno vstupu chybovosti ze strany periodicity výběžků. Vybrán byl úsek 14,5 m – 18,75 m.

*Tabulka 10 Hodnoty pro výpočet sklonu hladiny a sklonu energie*

$i_0$	$\Delta L$	$i_0 \cdot \Delta L$	$y_1$	ČE <sub>1</sub>	$y_2$	ČE <sub>2</sub>	$\Delta z$
0,005	4,25	0,021	0,751	0,220	0,751	0,220	0,021

Dosazením do rovnice byla získána hodnota  $\Delta z = 0,021$  m a následně dopočítán sklon hladiny jako:

(4.13)

$$i = \frac{\Delta z}{\Delta L} = 0,005$$

Jelikož hodnoty čáry energie ve staničení 14,5 m a 18,75 m jsou totožné, platí pro  $i_E$ :

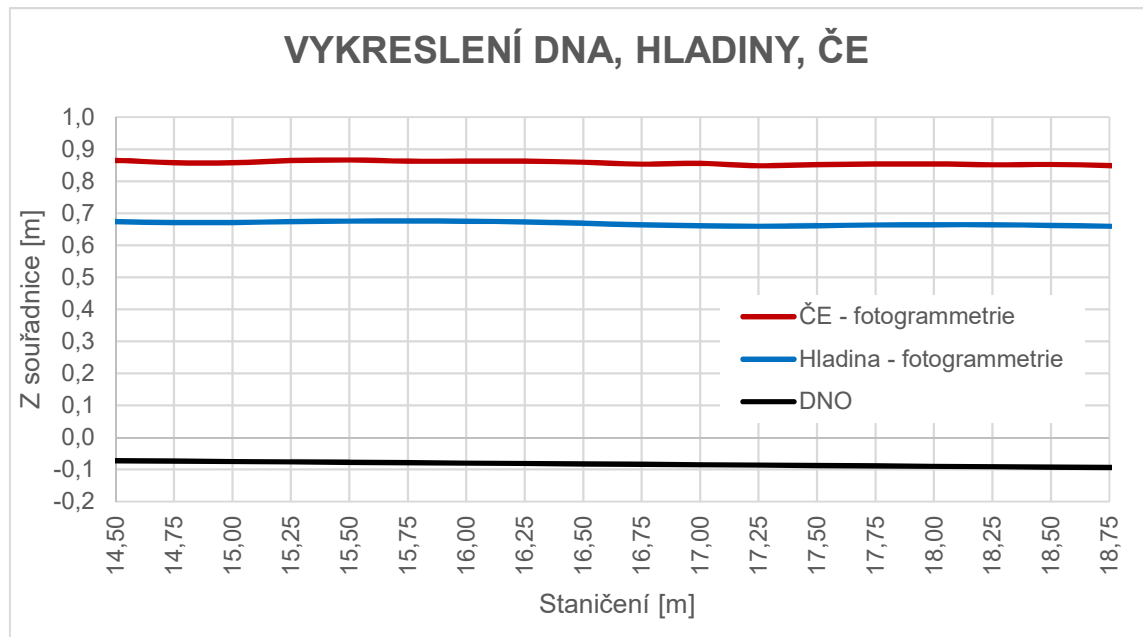
(4.14)

$$i_E = \frac{\Delta z}{\Delta L} = 0,005$$

(4.15)

$$i_0 = i = i_E = 0,5\% = 0,005$$

Autor tvrdí, že dno, hladina a čára energie jsou rovnoběžné, tvrzení lze vidět na *Obrázku 34* s vykreslením jednotlivých hodnot.



*Obrázek 34 Vykreslení dna, hladiny a čáry energie*

#### 4.7. Výpočet rovinného žlabu

Pro porovnání výsledků s rovinnou stěnou o různých drsnostech podle hodnoty drsnosti pískového zrna byl vytvořen 3D model se stejnou šířkou a délkou tak, aby byl dodržen stejný objem žlabu jako v případě matematického modelu z fotogrammetrie. Na model byly použity stejné okrajové a vstupní podmínky. Rozměry žlabu byly popsány v *Tabulce 11*

*Tabulka 11 Rozměry žlabu modelu s rovinnými stěnami*

Délka L [m]	Šířka B [m]	Výška h [m]	Sklon i [%]
20,0	1,07	1,0	0,5

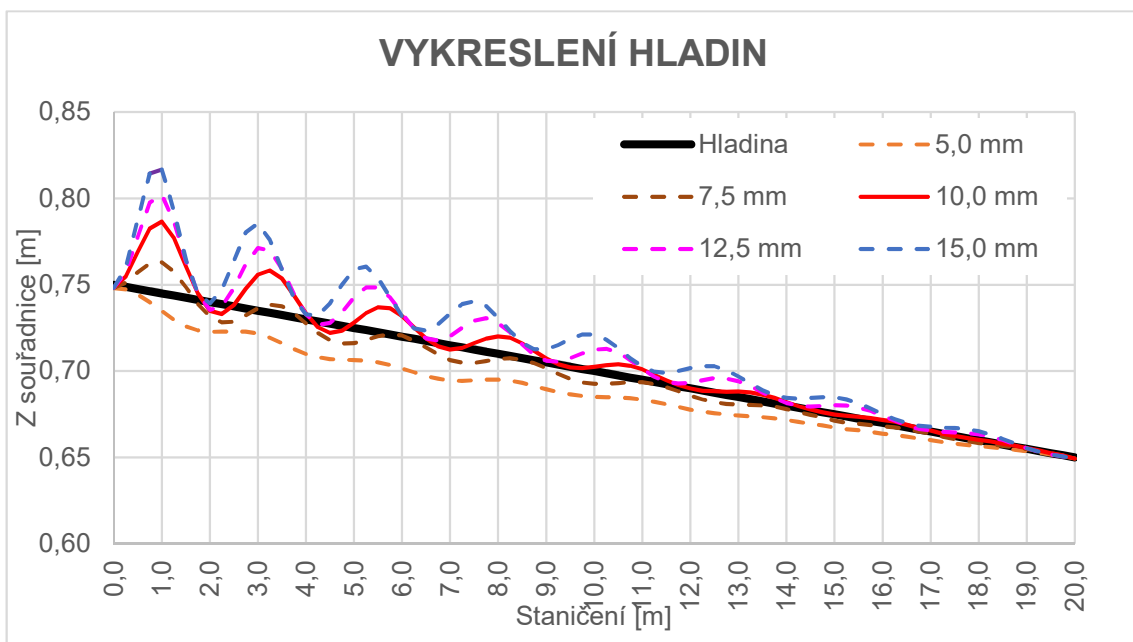
Vstupní hloubka hladiny byla nastavena na hodnotu 0,75m, aby byl zajištěn dostatečný prostor pro rozkolísanost hladiny a nedocházelo k přelítí vody přes stěny, zároveň aby byla zajištěna platnost Manningova součinitele [9], který platí v rozmezí:

(4.16)

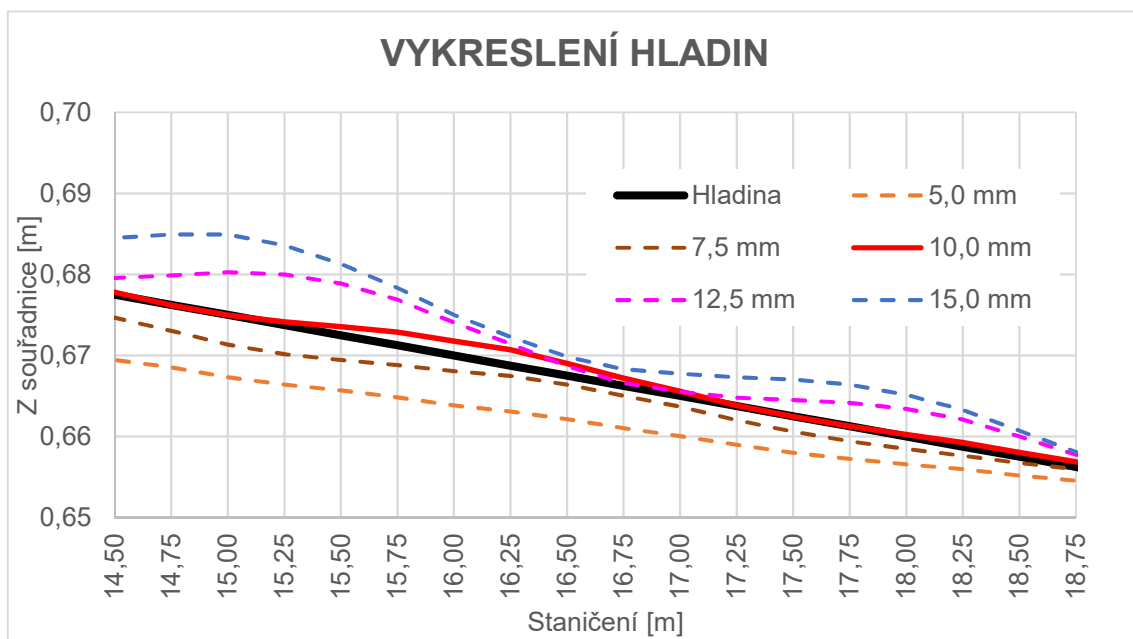
$$0,30 < R > 5,00 \text{ [m]}$$

Výstupní hloubka dolní hladiny byla nastavena na hodnotu 0,65 m, aby byl zajištěn 0,5% sklon hladiny při délce 20 metrů. Do okrajové podmínky INLET byla vpouštěna voda o rychlosti 1,90 m/s, to je přibližně rovno 1,5 m<sup>3</sup>/s.

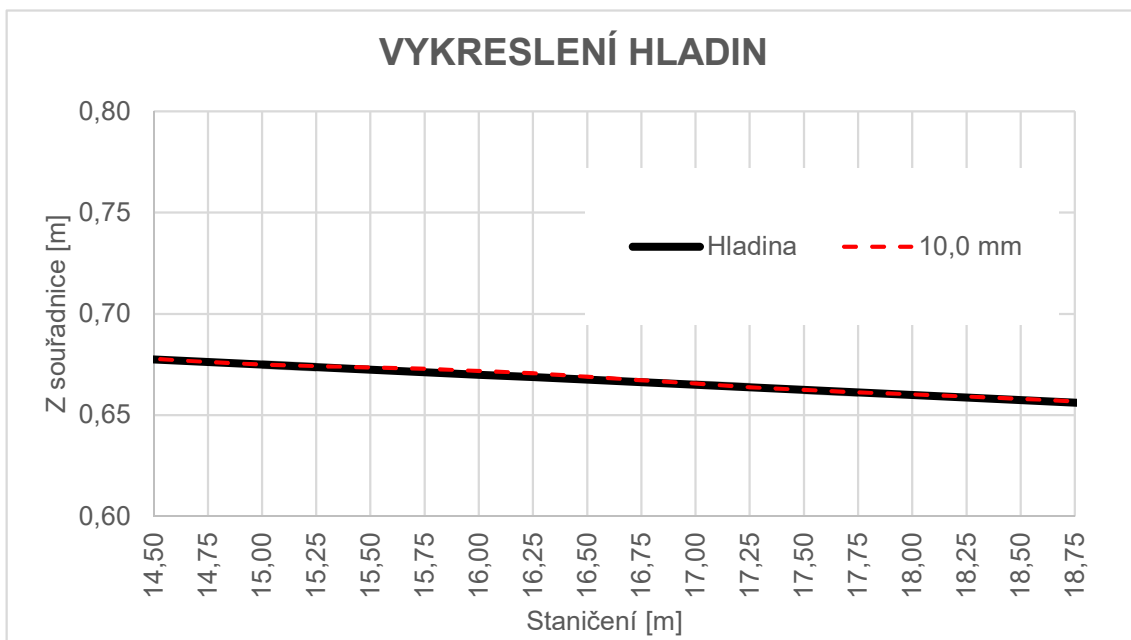
Hodnoty průměrného pískového zrna byly v rozmezí 5–15 mm. Dle *Obrázku 35* byly vykresleny jednotlivé hladiny pro různé hydraulické drsnosti za pomoci velikosti průměrného pískového zrna. V grafu byla zobrazena teoretická hladina. Hladiny s velikostí pískového zrna v rozmezí od 5 – 7,5 mm nedosahovaly k teoretické hladině, naopak hladina s velikostí pískového zrna 10,0 mm měla tendenci teoretickou hladinu kopírovat. Hladiny s velikostí pískového zrna v rozmezí od 12,5 – 15,0 mm měly větší hydraulickou drsnost a docházelo ke zvýšení hloubky. Tvrzení autora je zobrazeno na *Obrázku 36*. Díky obrázku lze říci, že odpovídající průměrná velikost pískového zrna se přibližně rovná velikosti 10,0 mm, která byla vykreslena na *Obrázku 37*.



*Obrázek 35 Vykreslení hladin žlabu s rovinnými stěnami v celém staničení*

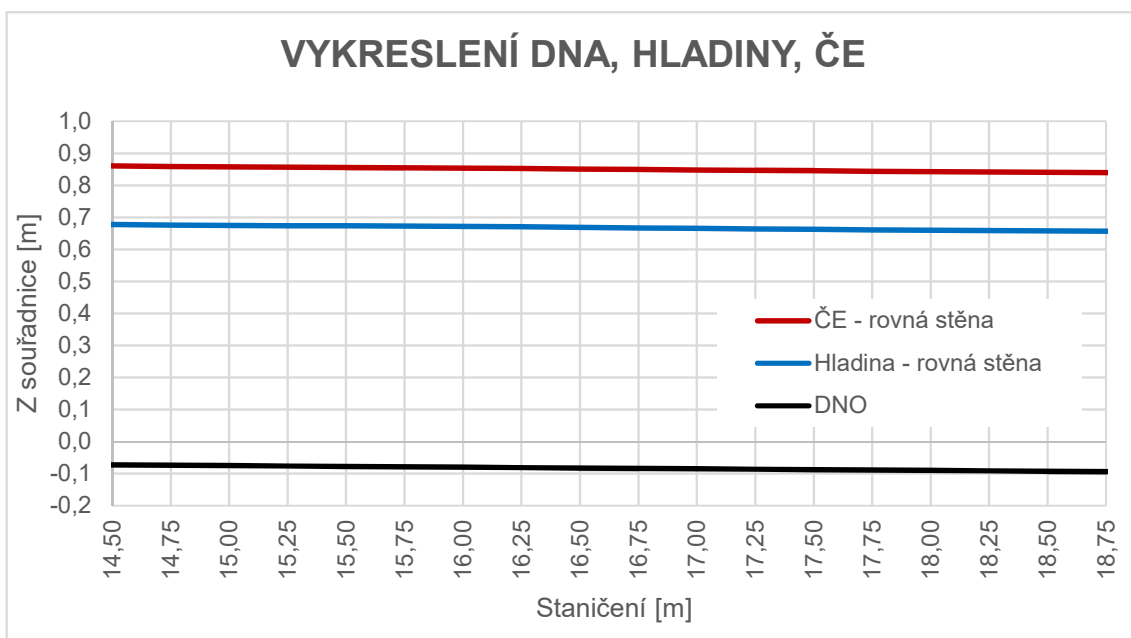


*Obrázek 36 Vykreslení hladin žlabu s rovinnými stěnami v rozsahu 14,50 – 18,75 m*



Obrázek 37 Vykreslení výsledné hladiny žlabu s rovinnými stěnami

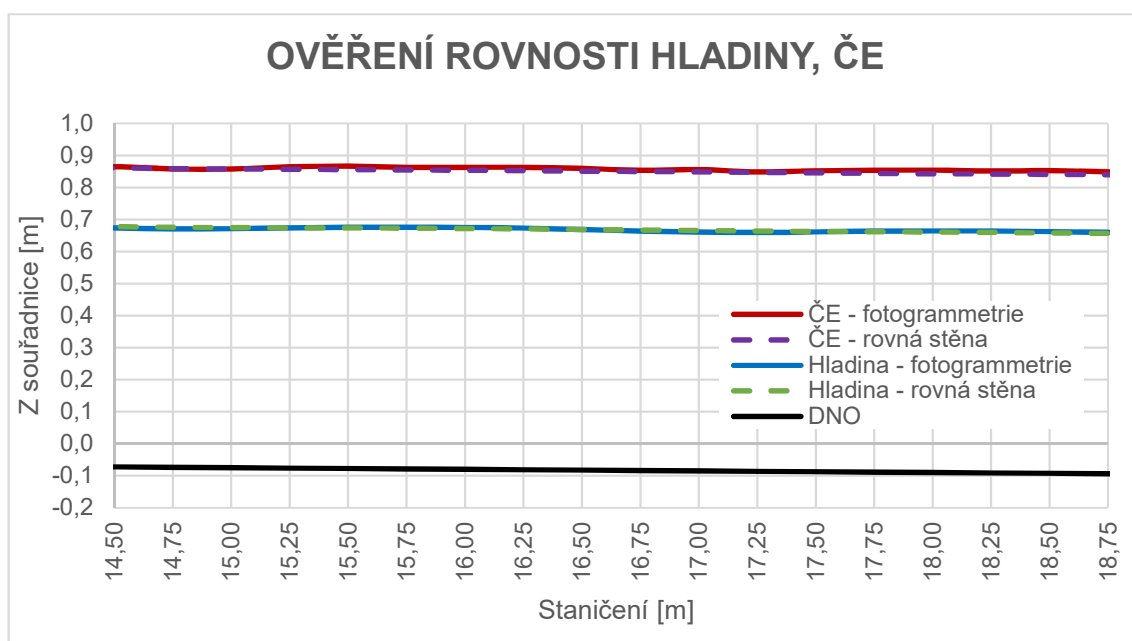
Následně bylo ověřeno rovnoměrné ustálené proudění a vypočítána čára energie stejně jako v kapitole 4.6.5. až 4.6.7. Výsledné hodnoty byly vykresleny na *Obrázku 38*.



Obrázek 38 Vykreslení dna, hladiny a čáry energie

## 5. VYHODNOCENÍ

Pro ověření správnosti výsledku byly výsledné hladiny pro matematický model z fotogrammetrie a s rovinnými stěnami vloženy do jednoho grafu, kde byly vykresleny hodnoty hladiny a čáry energie v podélném profilu. Dle *Obrázku 39* jsou si hodnoty rovny a autor tvrdí, že drsnost kamenného obkladu, který tvořil stěny žlabu, je roven Manningovu drsnostnímu součiniteli  $n = 0,0017$  a roven průměrnému pískovému zrně velikosti 0,010 metru.



Obrázek 39 Vykreslení rovnosti hladiny a čáry energie

## 6. SHRNU TÍ

V bakalářské práci byl vytvořen 3D model za pomoci fotogrammetrie a zjištěna hydraulická drsnost kamenného obkladu s následným zjištěním velikosti odpovídajícího pískového zrna pro model s rovinnými stěnami.

Pro vytvoření 3D modelu bylo potřeba najít vhodné řešení, které by bylo schopné elegantně přenést snímky obkladu do digitální podoby. Během tvorby bakalářské práce byla vyzkoušena řada softwarů, jako jsou Meshroom, Meshmixer, Rhino 3D a ICEM CFD.

Pro matematický model z fotogrammetrie autor našel pro vybraný kamenný obklad hodnotu Manningovy hydraulické drsnosti, která byla rovna  $n = 0,0017$ . Následně vytvořil stejný matematický model s rovinnými stěnami, kterým přiřazoval hodnotu průměrného pískového zrna. Autor zjistil, že velikost výběžku s výškou 0,010 metrů má stejné ztráty, jako kamenný obklad s hydraulickou drsností  $n = 0,0017$ .

Bakalářskou prací bylo dosaženo ověření, že lze za pomoci matematického modelování stanovit povrchové hydraulické ztráty žlabu.

## 7. REFERENCE

- [1] TOLMAN BŘETISLAV, *O pohybu vody v korytech otevřených*. Praha : České matice technická, 1908.
- [2] KOLÁŘ, PATOČKA, BÉM, *Hydraulika*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983.
- [3] TUL, nanoed.tul.cz. *Viskozita kapalin*. [Online] 2020. [Citace: 2020. března 11.] [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/9322/mod\\_resource/content/0/10.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/9322/mod_resource/content/0/10.pdf).
- [4] MATOUŠEK VÁCLAV, hydraulika.fsv.cvut.cz. *Turbulence*. [Online] [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web\\_HY3V\\_02\\_P RK\\_II\\_Turbulence.protected.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_02_P RK_II_Turbulence.protected.pdf).
- [5] WIKIPEDIA, *Reynoldsovo číslo*. [Online] 11. března 2020. [Citace: 11. března 2020.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo\\_%C4%8D%C3%ADslo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo).
- [6] K141 FSv ČVUT, hydraulika.fsv.cvut.cz. *Hydraulika otevřených koryt*. [Online] [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_05\\_Ustalene\\_proudeni\\_v\\_korytech.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_05_Ustalene_proudeni_v_korytech.pdf).
- [7] TANCJUROVÁ, *Mezní vrstva* [Online] [Citace: 12. Březen 2020.] [https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Tancjurova/files/teorie\\_hydraulickych\\_stroju/10%20Mezn%C3%AD%20vrstva.pdf](https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Tancjurova/files/teorie_hydraulickych_stroju/10%20Mezn%C3%AD%20vrstva.pdf).
- [8] VEN TE CHOW, *open-channel hydraulics*. Tokyo : McGraw-Hill Book Company, inc., 1959.
- [9] K141 FSv ČVUT, hydraulika.fsv.cvut.cz. *Hydraulika otevřených koryt* [Online] [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke\\_stazeni/prednasky/HYAR\\_pr\\_07.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/prednasky/HYAR_pr_07.pdf).
- [10] PAVELKA KAREL, *Fotogrammetrie 10* Praha : ČVUT, 2003.
- [11] M. J. WESTOBY, *Structure-from-Motion 'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. 2012.



- [12] MESHROOM, *Meshroom Manual*. [Online] <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/index.html>.
- [13] DMITRI KUZMIN, *Computational Fluid Dynamics* [Online] 1. Březen 2020. <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>.
- [14] ZÁCHA PAVEL, *Metoda konečných objemů (MKO)*. [Online] <https://adoc.tips/fluent-pednaky-metoda-konenych-objem-mko.html>.
- [15] ANSYS INC., ANSYS. [Online] [ansys.com](https://www.ansys.com).
- [16] ANSYS INC., *ANSYS CFX Tutorials*. Southpointe : ANSYS. Inc, 2010.
- [17] K141 FSv ČVUT, [hydraulika.fsv.cvut.cz](http://hydraulika.fsv.cvut.cz). *Hydraulika otevřených koryt* [Online] <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/cviceni.htm>.

## Seznam Obrázků:

Obrázek 1 Laminární proudění [4].....	7
Obrázek 2 Turbulentní proudění [4] .....	7
Obrázek 3 Vliv drsnosti na rozdělení rychlostí v korytě [6].....	8
Obrázek 4 Průběh působení mezní vrstvy v otevřeném korytě [8].....	9
Obrázek 5 Rozdělení rychlosti podél hladkého povrchu [8].....	10
Obrázek 6 Drsnosti povrchu (a) Hladký (b) Vlnitý (c) Drsný [8].....	11
Obrázek 7 Hodnoty pro drsnostní koeficient podle Cowana [8].....	14
Obrázek 8 Rovnoměrné ustálené proudění vody v korytě [9] .....	15
Obrázek 9 Kamenný obklad z opuky .....	17
Obrázek 10 Kamenný obklad lomové žuly .....	18
Obrázek 11 Zobrazení polohy fotoaparátu při pořizování snímku .....	19
Obrázek 12 Vysoce kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 3 199 215 uzlů.....	20
Obrázek 13 Kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 187 869 uzlů.....	20
Obrázek 14 kvalitní síť (vlevo) a povrch (vpravo) o počtu 74 555 uzlů.....	20
Obrázek 15 U průřez žlabu o šířce a výšce 1 m.....	21
Obrázek 16 Snímek kamenného obkladu z lomové žuly .....	22
Obrázek 17 3D model ze softwaru Meshroom za pomoci metody SFM.....	22
Obrázek 18 Řez sítí o velikosti elementu 32 mm .....	25
Obrázek 19 Zobrazení okrajové podmínky na modelu.....	27
Obrázek 20 Zobrazení okrajové podmínky na modelu .....	27
Obrázek 21 Zobrazení okrajové podmínky na modelu.....	28
Obrázek 22 Zobrazení okrajové podmínky na modelu.....	28
Obrázek 23 Rozdíl mezi přítokem a odtokem [%].....	29
Obrázek 24 Vykreslení hladin v celém staničení.....	31
Obrázek 25 Vykreslení hladin ve staničení 13,50 – 20,0 m .....	32
Obrázek 26 Vykreslení vybraných hladin ve staničení 13,50 – 20,0 m .....	32
Obrázek 27 Porovnání vlivu sítě na výpočet .....	33
Obrázek 28 Vykreslení hladin v celém staničení.....	35
Obrázek 29 Vykreslení hladin ve staničení 14,50 – 18,75 m .....	35
Obrázek 30 Vykreslení výsledné hladiny ve staničení 14,50 – 18,75 m .....	36
Obrázek 31 Zobrazení hladiny u stěn s použitím fotogrammetrie.....	38
Obrázek 32 Zobrazení hladiny u stěn s rovnou stěnou .....	38

Obrázek 33 Graf vykreslující ověření podmínky $S; y; v = \text{konst}$ .....	40
Obrázek 34 Vykreslení dna, hladiny a čáry energie .....	44
Obrázek 35 Vykreslení hladin žlabu s rovinnými stěnami v celém staničení.....	46
Obrázek 36 Vykreslení hladin žlabu s rovinnými stěnami v rozsahu 14,50 – 18,75 m..	46
Obrázek 37 Vykreslení výsledné hladiny žlabu s rovinnými stěnami .....	47
Obrázek 38 Vykreslení dna, hladiny a čáry energie .....	47
Obrázek 39 Vykreslení rovnosti hladiny a čáry energie .....	48

### **Seznam Tabulek:**

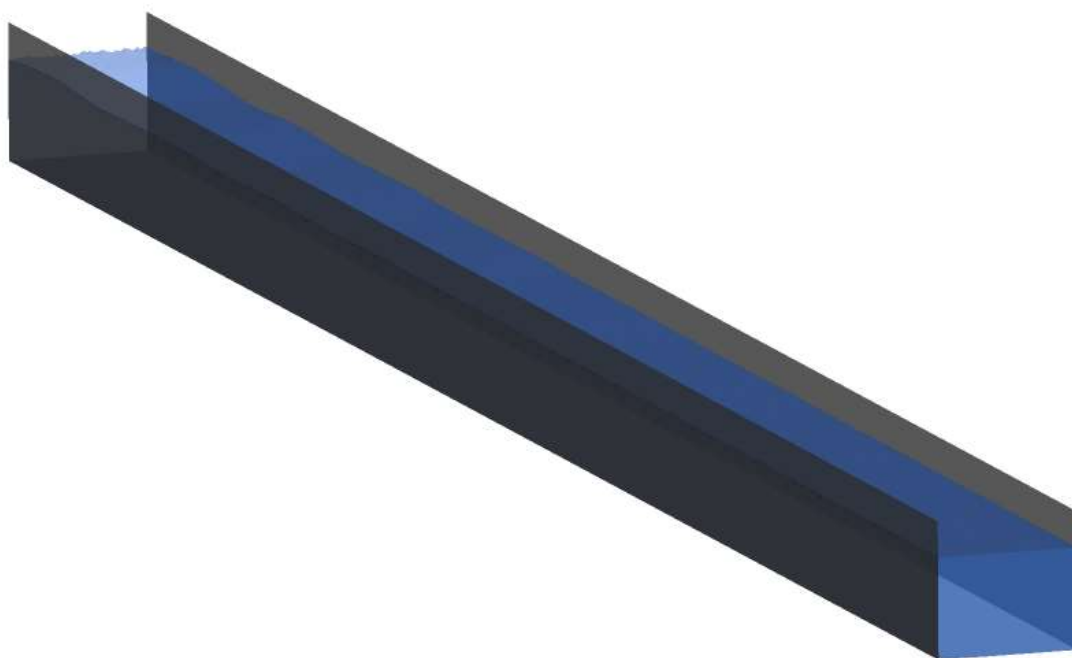
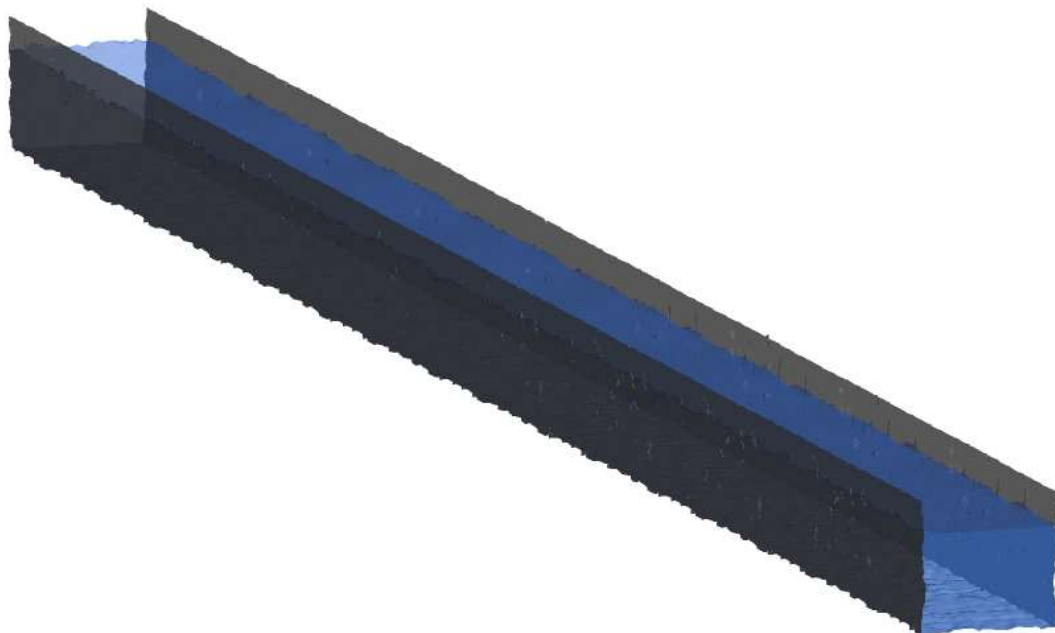
Tabulka 1 Seznam použitých výrazů pro zajištění správného fungování modelu.....	26
Tabulka 2 Rozměry žlabu prvního modelu.....	30
Tabulka 3 Rozměry žlabu druhého modelu .....	34
Tabulka 4 Zobrazení rozkolísanosti hladin v ustáleném úseku .....	37
Tabulka 5 Zobrazení vlivu fotogrammetrie na vlnění modelu .....	39
Tabulka 6 Hodnoty rovnoměrně ustáleného proudění.....	41
Tabulka 7 Výpočet hydraulické drsnosti z průměrných hodnot .....	42
Tabulka 8 Výpočet hydraulické drsnosti se zvýšenou hladinou .....	42
Tabulka 9 Výpočet hydraulické drsnosti se sníženou hladinou.....	42
Tabulka 10 Hodnoty pro výpočet sklonu hladiny a sklonu energie.....	43
Tabulka 11 Rozměry žlabu modelu s rovinnými stěnami.....	45

## 8. PŘÍLOHY

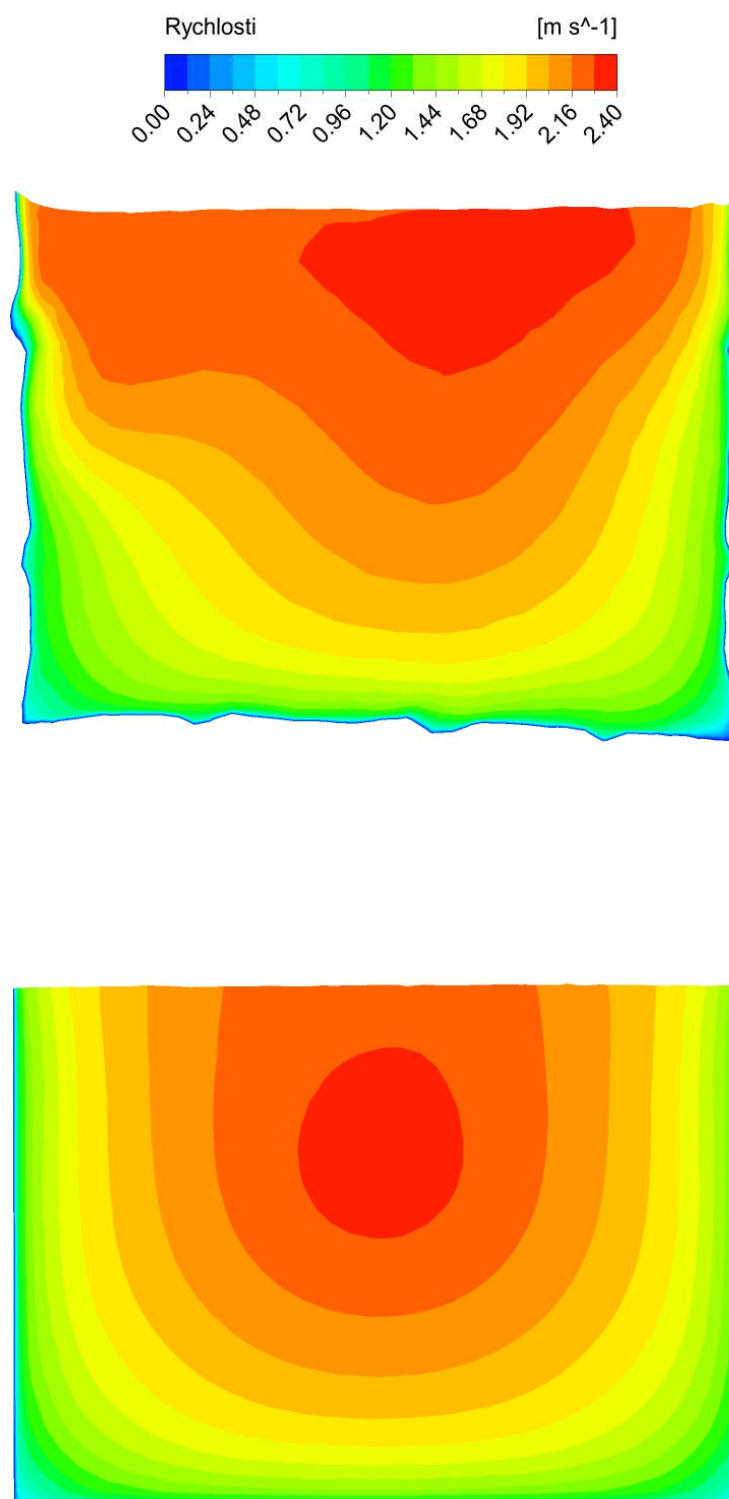
### 8.1. Porovnání 3D modelu z fotogrammetrie se snímkem kamenného obkladu



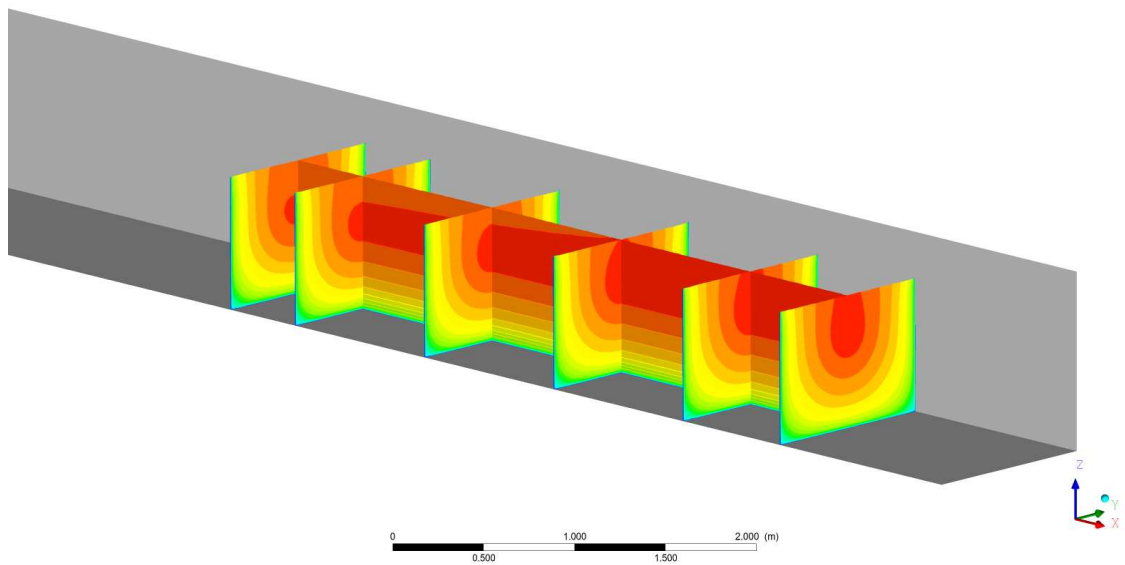
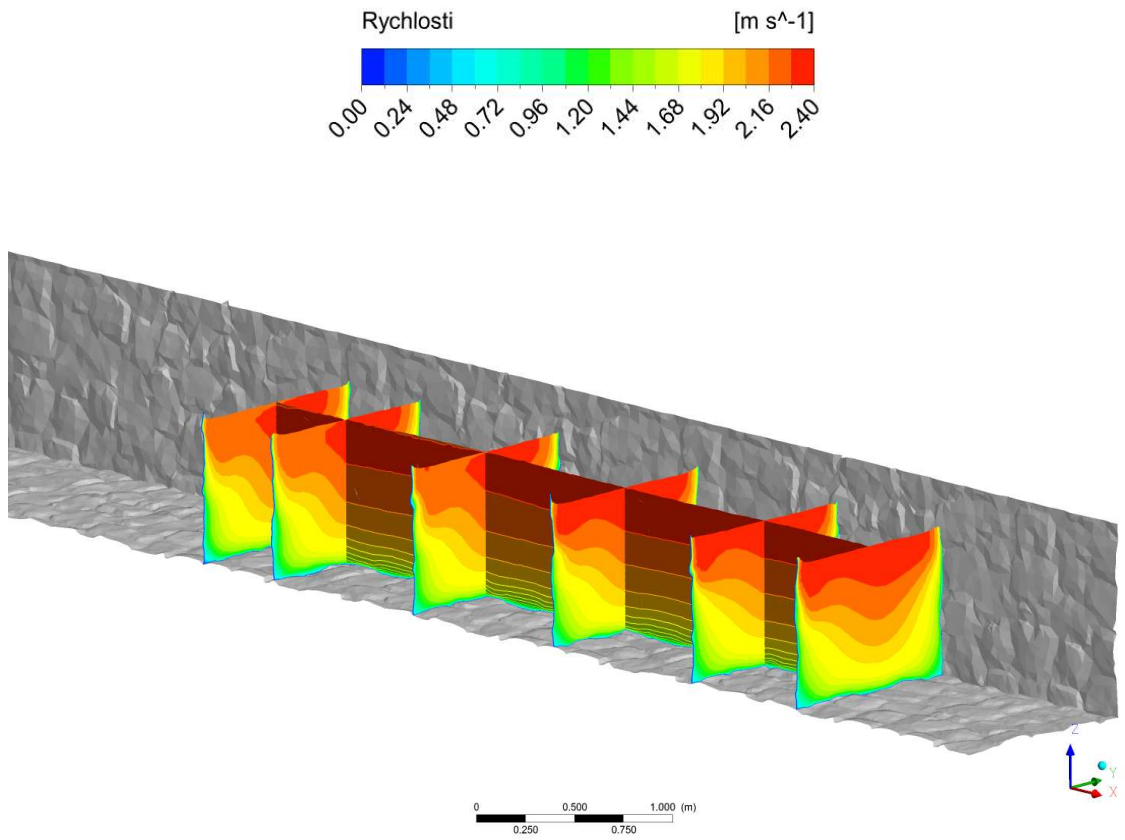
## 8.2. Zobrazení výsledných 3D modelů



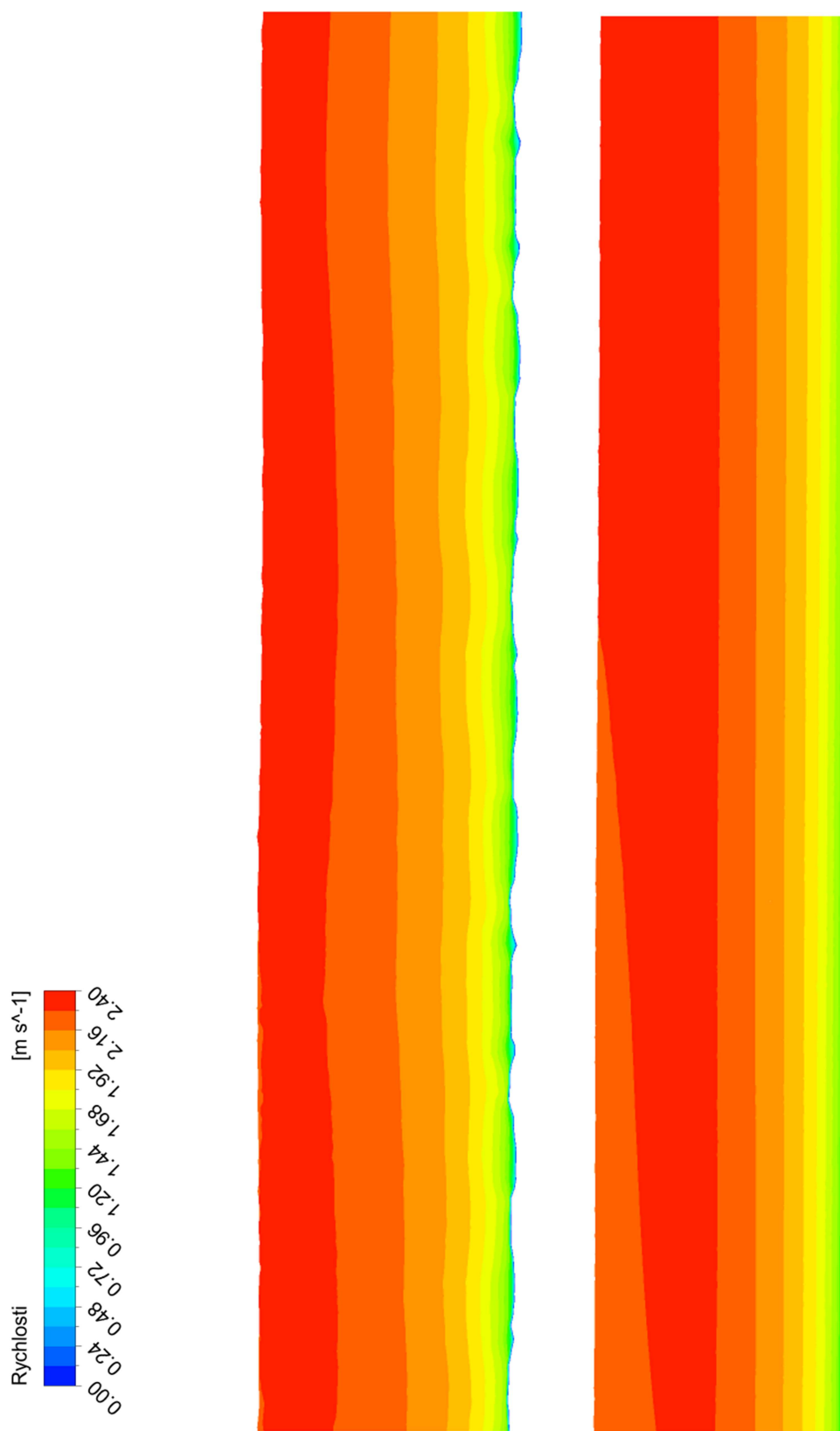
### 8.3. Vykreslení rychlostí ve staničení x = 16,00 m



#### 8.4. Vykreslení rychlostí v ustáleném rovnoměrném úseku

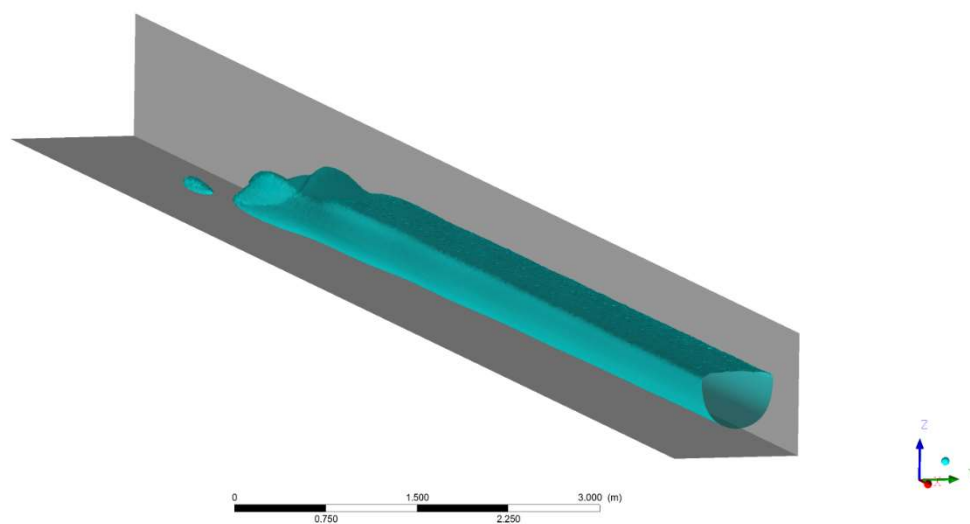
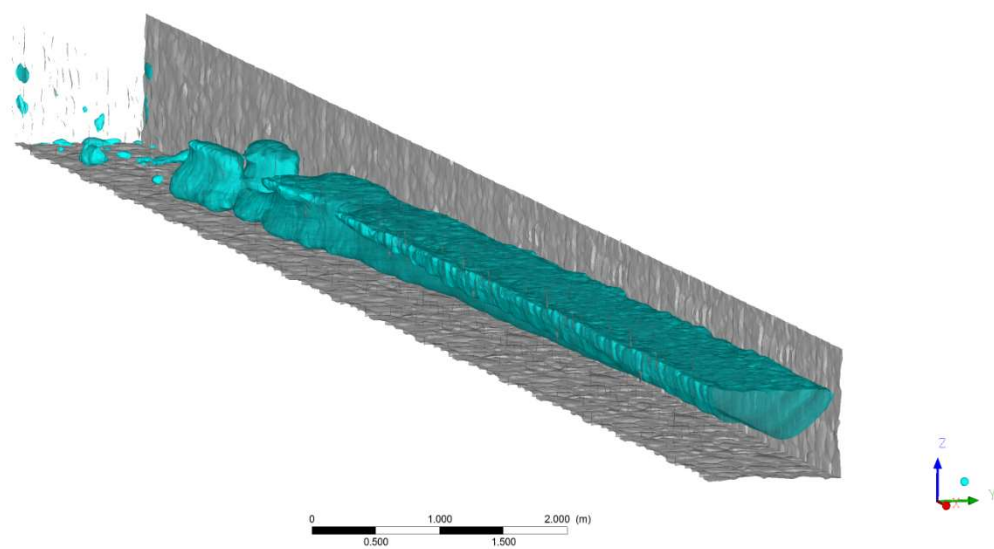


### 8.5. Podélný řez v ustáleném rovnoměrném úseku

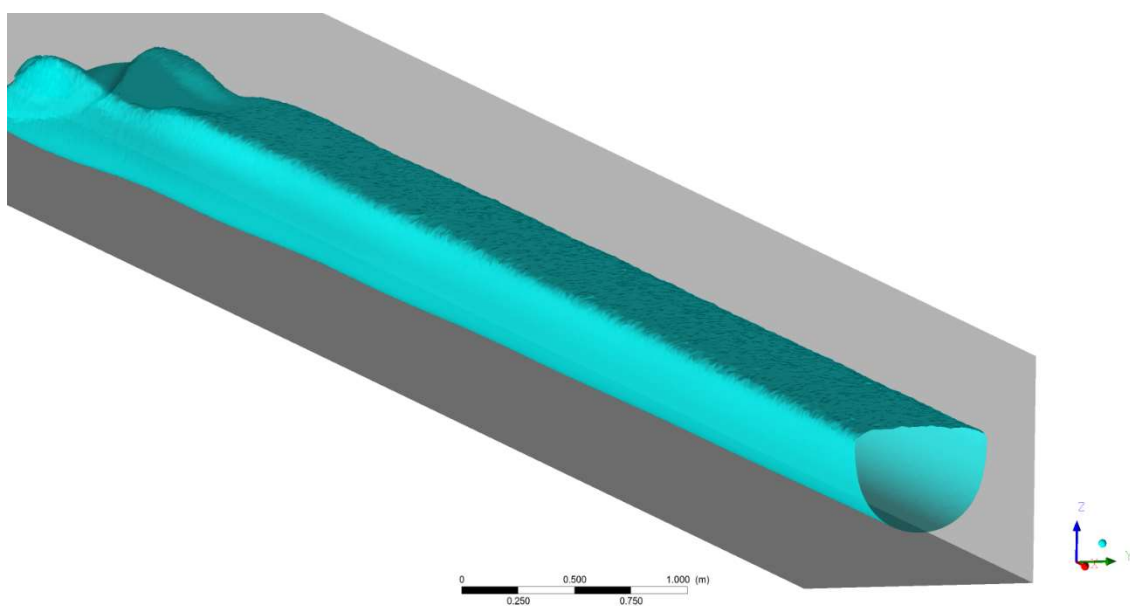
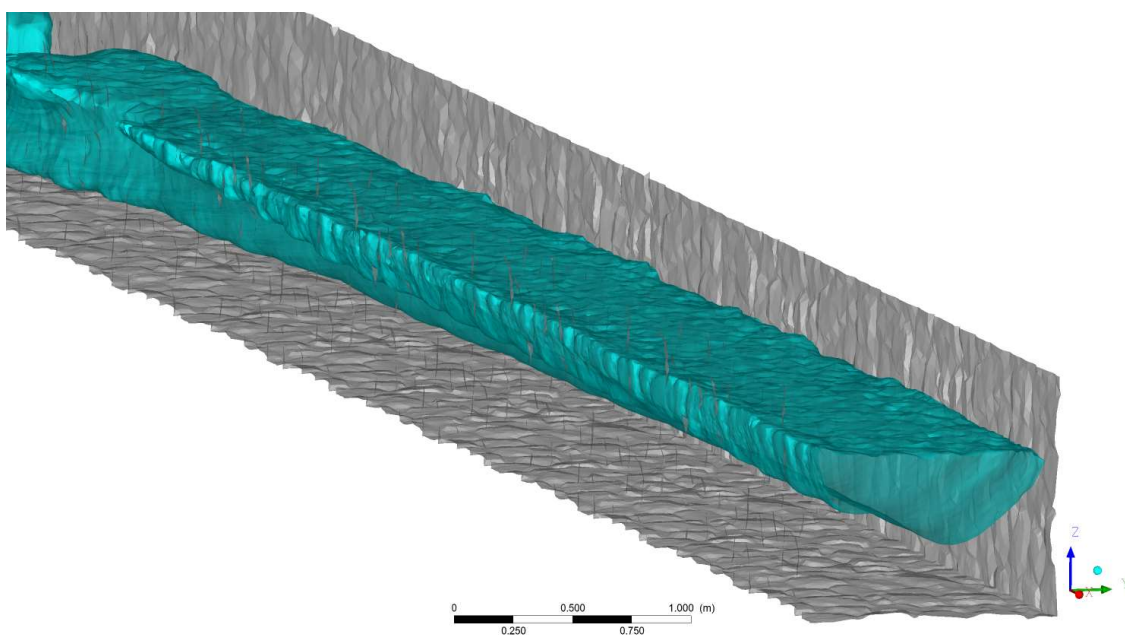




### 8.6. Zobrazení ustáleného proudění při rychlosti 2,10 m/s



### 8.7. Detail zobrazení ustáleného proudění při rychlosti 2,10 m/s



## 8.8. Hodnoty Manningova drsnostního součinitele n [17]

Druh koryta a jeho popis	n		
	min.	stř.	max.
<b>A. Uzavřené profily částečně plněné</b>			
I. Kovové materiály			
1. Ocelová potrubí svařovaná	0,010	0,012	0,014
2. Litinové potrubí	0,010	0,014	0,016
II. Nekovové materiály			
1. Plastické hmoty	0,008	0,009	0,010
2. Hlazená cementová malta	0,011	0,013	0,015
4. Beton			
a) do kovové formy	0,012	0,013	0,014
b) do dřevěné formy	0,012	0,016	0,020
c) propustky (event. se slabými nánosy)	0,010	0,012	0,014
d) rovný kanalizační odpad s revizními šachtami a vpustěmi	0,013	0,015	0,017
5. Kamenina - odpadní potrubí, drenážní trubky	0,011	0,013	0,017
6. Zdivo			
a) zvonivky	0,011	0,013	0,015
b) obyčejné cihly do cementové malty	0,012	0,015	0,017
<b>B. Otevřené profily s částečně nebo zcela umělým povrchem</b>			
I. Kovové materiály			
1. Hladký kovový povrch			
a) nenatřený	0,012	0,013	0,017
b) natřený	0,011	0,012	0,014
II. Nekovové materiály			
1. Cementový povrch			
a) vyhlazený	0,010	0,011	0,013
b) běžná omítka	0,011	0,013	0,015
2. Dřevo			
a) hoblované	0,010	0,012	0,015
b) nehoblované	0,011	0,013	0,015
c) potažené lepenkou	0,010	0,014	0,017
3. Beton			
a) hlazený ocelovým hladítkem	0,011	0,013	0,015
b) zatřený dřevěným hladítkem	0,013	0,015	0,016
c) nazatřený	0,014	0,017	0,020
d) torkretovaný, rovný povrch	0,016	0,019	0,023
e) torkretovaný, vlnitý povrch	0,018	0,022	0,025
f) na dobře vyhloubené skále	0,017	0,020	
g) na nepravidelně vyhloubené skále	0,022	0,027	
4. Betonové dno se stěnami			
a) z opracovaného kamene do betonu	0,015	0,017	0,020
b) ze zdiva z lomového kamene - omítnutého	0,016	0,020	0,024
c) ze zdiva z lomového kamene - neomítnutého	0,020	0,025	0,030
5. Štěrkové dno se stěnami			
a) z betonu	0,015	0,019	0,025
b) ze smíšeného kamene do betonu	0,020	0,023	0,026
c) z lomového kamene na sucho, nebo s pohozením	0,023	0,033	0,036
6. cihly do cementové malty	0,012	0,015	0,018
7. Kamenné opevnění			
a) dlažby s vylitím spar cementovou maltou	0,017	0,025	0,030
b) dlažby na sucho	0,023	0,032	0,035
9. Vegetační opevnění	0,030		0,500