

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lacina Jméno: Martin Osobní číslo: 477398

Zadávací katedra: 11141 - Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza odporů pro 2D matematické modely

Název bakalářské práce anglicky: Roughness analysis for 2D mathematical models

Pokyny pro vypracování:

Zpracování srovnávací analýzy pro vyjádření odporů pomocí Manningova součinitele drsnosti v případě použití 2D matematických modelů FESWMS a HEC-RAS se zvláštním zřetelem na posouzení vlivu modelů turbulence.

Seznam doporučené literatury:

Szymkiewitz, R.: Numerical Modelling in Open Channel Hydraulics

Hec-Ras, River Analysis System, User s Manual, Us Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, February 2016

Hec-Ras, River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Us Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, February 2016

Froehlich, D., C.: Finite Element Surface-Water Modeling System, Users Manual, U.S. Department of Transportation, FHA, 2001.

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 27. 2. 2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 16. 5. 2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat 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“.*

13. 2021

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
katedra hydrauliky a hydrologie



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

**Název bakalářské práce**

**Porovnání numerického modelování  
v programu HEC-RAS a FESWMS**

Autor bakalářské práce:	Martin Lacina
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.
Rok obhajoby:	2021

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Porovnání numerického modelování v programu HEC-RAS a FESWMS“ vypracoval samostatně a veškerou použitou literaturu a další prameny jsem řádně označil a uvedl v přiloženém seznamu.

Vzhledem k cenným radám a vedení mé bakalářské práce doc. Ing. Alešem Havlíkem, CSc. jsem považoval za vhodné používat v práci množného čísla.

V Praze dne 6. 12. 2021

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc. za poskytnutí výpočetního programu FESWMS, odborné konzultace, cenné rady a čas strávený při konzultacích.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá tvorbou dvoudimenzionálních numerických modelů a jejich porovnáním ve výpočetních programech HEC-RAS a SMS-FESWMS při ustáleném rovnoměrném proudění v přímém korytě lichoběžníkového tvaru. Výpočty probíhají pro případ kapacitního průtoku ve třech variantách sklonů (1, 5 a 10 ‰) a třech variantách šíří dna (4 m, 10 m, 20 m). Práce obsahuje porovnání výsledků výpočetních programů a popis tvorby jejich modelů.

## **Abstract**

This thesis deals with the creation of two-dimensional numerical models and their comparison in the computer programs HEC-RAS and SMS-FESWMS with an uniform steady flow. Models has a straight trapezoidal shape with water depth 3 m. Calculations are performed for the case of capacitive pressure in three variants of slope (1, 5 and 10 ‰) and three variants of bottom width (4 m, 10 m, 20 m). The work contains a comparison of the results of computer programs and a description of the creation of these models.

## **Klíčová slova**

HEC-RAS, SMS – FESWMS, ustálené rovnoměrné proudění, kapacitní průtok, dvourozměrné matematické modelování, rychlostní pole, Manningův součinitel drsnosti

## **Keywords**

HEC-RAS, SMS - FESWMS, uniform steady flow, capacitive flow, two-dimensional mathematical modelling, velocity field, Manning roughness coefficient

# Obsah

1	Úvod.....	8
2	Problematika matematického modelování .....	9
2.1	Vývoj matematického modelování.....	9
2.2	Druhy matematických modelů pro proudění s volnou hladinou .....	10
2.2.1	Jednorozměrné .....	10
2.2.2	Dvourozměrné.....	10
2.2.3	Trojrozměrné.....	10
3	Jednorozměrný výpočet.....	11
3.1	Úvod.....	11
3.2	Určení odporu povrchu koryta .....	11
3.3	Použité rovnice .....	12
3.3.1	Výpočet průtoku.....	12
3.3.2	Rozdělení rychlostí po délce průřezu.....	13
3.4	Výsledky jednorozměrného výpočtu.....	15
4	Výpočetní program HEC-RAS.....	17
4.1	Řídící rovnice výpočtu .....	17
4.1.1	Rovnice zachování hmotnosti (kontinuity).....	17
4.1.2	Rovnice zachování hybnosti (momentová rovnice).....	20
4.2	Difúzní vlnová aproximace do rovnic mělké vody .....	21
4.3	Tvorba modelu .....	22
4.3.1	Příprava souřadnic .....	22
4.3.2	Tvorba povrchu v programu Civil 3D .....	23
4.3.3	Tvorba modelu v programu HEC-RAS .....	24
4.4	Výsledky výpočtu v HEC-RAS.....	26

4.4.1 Závislost Manningova součinitele drsnosti na parametru kinematické viskozity vody.....	27
4.4.2 Rozdělení rychlostí po průřezu.....	29
5 Výpočetní program SMS – FESWMS .....	32
5.1 SMS – Surface water modelling system .....	32
5.1.1 FESWMS–2DH .....	32
5.1.2 Hydraulické rovnice.....	32
5.1.3 Metoda vážených reziduí .....	36
5.2 Tvorba modelu .....	37
5.2.1 Příprava souřadnic .....	37
5.2.2 Tvorba povrchu v programu SMS .....	37
5.3 Výstupy výpočtů .....	39
5.3.1 Závislost Manningova drsnostního součinitele na parametru základní kinematické turbulentní viskozity kapaliny.....	39
5.3.2 Rozdělení rychlostí po průřezu.....	41
6 Porovnání rychlostních polí .....	44
7 Závěr.....	46
8 Seznam zkratk a symbolů.....	48
9 Citovaná literatura .....	51
10 Seznam příloh.....	52
11 Seznam obrázků, grafů a tabulek .....	53
Příloha A - Výstup výpočtů z programu HEC-RAS .....	55
Příloha B - Výstup výpočtů z programu FESWMS .....	56
Příloha C - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity - FESWMS.....	57
Příloha D - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity – HEC-RAS ....	59
Příloha E - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – FESWMS.....	61



Příloha F - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – HEC-RAS .....	64
Příloha G - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – Velikanov .....	67
Příloha H - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – sloučené grafy .....	68

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáváním Manningova součinitele drsnosti u dvourozměrného matematického modelování v programech HEC-RAS a SMS-FESWMS oproti jednorozměrným výpočtům. Výchozí hodnota součinitele drsnosti byla zvolena na základě Chowových tabulek pro případ přímého toku se štěrkovým dnem a svahy z kamenné rovnaniny nebo záhozu v průměrném až špatném stavu.

Hlavním cílem práce je poukázání na vztahy mezi podélnými sklony, drsnostními součiniteli koryta, rozdělením průměrných svislicových rychlostí napříč řezem koryta a kinematickou viskozitou proudící kapaliny.

## 2 Problematika matematického modelování

### 2.1 Vývoj matematického modelování

Za zakladatele hydroinformatiky můžeme považovat prof. Emerituse Michaela Abbota, který hydroinformatiku jako vědní obor definoval poprvé již v roce 1987. Vývoj matematického modelování v hydroinformatice můžeme rozdělit do čtyř období. [2]

První období nastává v 50. letech 20. století, kdy se na scénu dostávají první analogové počítače. Výpočty jsou řešeny numerickými metodami za pomoci výpočetních strojů jednoduchým vyhodnocováním dat. [2]

Za druhou generaci matematických simulačních modelů lze považovat příchod modernějších počítačů a výpočetních algoritmů, jakými jsou metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí a metoda hraničních prvků. Tato doba se odehrává v 60. letech 20. století. Výpočetní programy této doby vyžadovaly vedle znalosti hydrauliky a hydrologie také značnou znalost programovacího jazyka. Z tohoto důvodu byl trh velmi omezený, výpočetní programy byly drahé a existovala pouze hrstka uživatelů schopných tyto programy využívat. [2]

Třetí generaci symbolicky zahájil Dánský hydraulický institut v 70. letech 20. století založením oddělení výpočetní hydrauliky. Zde se vyvinul tzv. stavebnicový systém, jehož výhodou je vyšší míra ochrany proti chybám výpočtu a uživatelsky mnohem přívětivější prostředí, než je u modelů druhé generace. Tyto výpočetní modely také začaly využívat databázové soubory vstupních dat. V praxi se tak na výpočtu jednoho modelu mohlo podílet více pracovníků, kteří mohli vždy udělat jen část operace a navázat na předchozí kroky spolupracovníků. [2]

Pro čtvrtou generaci je typický masový rozvoj využívání výpočetních modelů především z důvodu rozvoje počítačové technologie a její cenové dostupnosti pro soukromé uživatele. S rozvojem stolních počítačů jde ruku v ruce vývoj uživatelského prostředí výpočetních programů. Hlavním znakem pro modely čtvrté generace se stává systém s intuitivním ovládním pomocí ikon uvnitř programu, tzv. menu system. Na rozdíl od předchozí generace výpočetních modelů se vývojem těchto programů začínají zabývat i čistě programátorské společnosti, které tento produkt distribuují. Vzniká tak vyšší konkurence na trhu a vysoký rozvoj výpočetních modelů. [2]

## **2.2 Druhy matematických modelů pro proudění s volnou hladinou**

Dle rozměrů výpočtu lze dělit matematické modely na jednorozměrné, dvourozměrné a trojrozměrné.

### **2.2.1 Jednorozměrné**

Jednorozměrné matematické modely je vhodné použít u říčních koryt s dlouhými přímými úseky a meandry s velkým poloměrem. Výpočet se řídí pomocí osy koryta spolu s nadefinovanými příčnými profily toku, které obsahují charakteristiky pro celý průřez. Mezi jednotlivými příčnými průřezy se pro výpočet předpokládá lineární průběh hladiny, z tohoto důvodu je nutné při možné změně hladiny umístit do místa více profilů. Mezi nejznámější 1D výpočetní modely se řadí HEC-RAS, MIKE 11, HYDROCHECK 1 a SMS: 1D hydraulic cross section model. [3]

### **2.2.2 Dvourozměrné**

V případech, kdy mají v toku významné vlivy příčné směry proudění, nelze již pro získání spolehlivých výsledků použít jednorozměrné matematické modely. Tento stav nastává při velkém meandrování toku nebo při značné záplavové oblasti. Výpočet je založen na vytvoření výpočetní sítě obsahujících prvky. Následné řešení probíhá za pomoci řídicích rovnic při zanedbání vertikálních směrů vektorů rychlosti použitím numerických metod. Příkladem takových modelů jsou SMS – RMA2, HIVEL2D, FESWMS, HEC-RAS, MIKE 21. [3]

### **2.2.3 Trojrozměrné**

Jedná se o nejsložitější metodu výpočtu. Používají se při modelování objektů na vodních tocích nebo při modelování vodního paprsku při nátoku na turbínu. Příprava výpočetní sítě je podstatně složitější než u předchozích modelů a výpočty jsou velmi náročné na výpočetní výkon počítače. Z tohoto důvodu se tyto metody nedají použít na rozsáhlé oblasti a jsou pouze zpřesňujícím prvkem pro dvourozměrné výpočetní modely. Mezi tyto modely smíme zařadit např. FLUENT a COMSOL Multiphysics. [3]

## 3 Jednorozměrný výpočet

### 3.1 Úvod

Pro kalibraci modelů vytvořených v programu HEC-RAS a SMS-FESWMS byla, pro případ prizmatického koryta počítaného při ustáleném rovnoměrném proudění, použita Chézyho rovnice s doplněním Manningova drsnostního součinitele. Zvolený výpočet lze použít za předpokladu že:

1. Profil koryta je neměnný po celé délce výpočetního úseku.
2. Vodní tok je přímý.
3. Drsnostní součinitel se po délce koryta nemění.
4. Sklon dna je konstantní.
5. Sklon čáry energie je rovnoběžný se sklonem dna.

### 3.2 Určení odporu povrchu koryta

K určení odporu povrchu koryta slouží Manningův drsnostní součinitel značený písmenem  $n$ . Jeho přesné určení je velmi složité a používají se následující metody:

1. Za pomoci tabulek – Běžně se s tímto postupem setkáme při revitalizaci toků v rámci zjednodušení. Použít se dá např. tabulka dle Coona, který určil součinitel drsnosti na základě velikosti zrna kameniva. [4]
2. Určení podle Chowa – Van Te Chow vytvořil v roce 1959 soubor tabulek s podrobným slovním popisem toku. Zároveň je zde pro každou hodnotu součinitele drsnosti určena jeho střední hodnota pro průměrný stav koryta a dále horní při špatném stavu a dolní hranice drsnostního součinitele pro dobrý stav vodního toku. [4]
3. Porovnání skutečností s katalogem fotografií – Při tomto postupu máme k dispozici tzv. katalog hydraulických drsností se vzorovými fotografiemi a s přiřazeným drsnostním součinitelem. Na základě porovnávání skutečných fotografií s katalogem lze tak snadno určit hodnota tohoto parametru. [4]
4. Vypočtení dle charakteristického zrna na základě empirických vzorců – První pokusy provedl Strickler zavedením charakteristického rozměru zrna při výpočtu Chézyho rychlostního součinitele. Porovnáním

s Manningovou rovnicí pro rychlostní součinitel (3.2) jsme schopni přiřadit zrnu kameniva příslušný drsnostní součinitel. [4]

5. Přímý výpočet součinitele – Tento způsob se používá přímo na místě. Po změření všech zbylých veličin rovnice průtoku (3.4) jsme schopni Manningův součinitel drsnosti dopočítat. [4]

Námi zvolená výchozí hodnota Manningova součinitele drsnosti dle Chowa odpovídá přímému vodnímu toku se šterkovým dnem a svahy z kamenné rovinaniny nebo záhozu v průměrném až špatném stavu. [4]

### 3.3 Použité rovnice

#### 3.3.1 Výpočet průtoku

Pro stanovení průtoku v prizmatikém korytě jsme použili následující rovnice: Chézyho rovnice pro ustálené rovnoměrné proudění,

$$Q = S * C * \sqrt{R * i_0} \quad (3.1)$$

kde  $Q$  vyjadřuje průtok daným profilem toku,  $S$  je obsah průřezové plochy,  $C$  zastupuje Chézyho rychlostní součinitel,  $i_0$  je sklon dna, který byl v našem specifickém případě shodný se sklonem čáry energie a  $R$  je hydraulický poloměr.

Chézyho rychlostní součinitel jsme získali při použití Manningova drsnostního součinitele  $n$  ve tvaru

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (3.2)$$

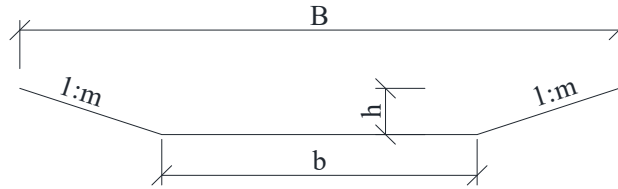
po dosazení do Chézyho rovnice (3.1),

$$Q = S * R^{\frac{1}{6}} * \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{2}} * i_0^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

z čehož po úpravě vznikla konečná rovnice pro výpočet průtoku.

$$Q = S * \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * i_0^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Jelikož byla srovnávána pouze koryta lichoběžníkového tvaru, mohli jsme plochu průřezu určit ze vztahu,



3.1 - Obrázek průřezu profilu koryta

$$S = h * (b + h * m) \quad (3.5)$$

kde  $h$  je hloubka koryta,  $b$  je šíře dna a  $1:m$  je sklon břehů.

Hydraulický poloměr byl spočítán z rovnice (3.6).

$$R = \frac{S}{O} \quad (3.6)$$

Pro lichoběžníkový tvar průřezu toku byl získán omočený obvod  $O$ .

$$O = b + \sqrt{1 + m^2} * 2h \quad (3.7)$$

Dále bylo při výpočtu vhodné zjistit režim proudění v námi řešených případech.

Pro stanovení režimu proudění v korytě jsme použili rozlišení podle Froudova čísla  $Fr$ .

$$Fr = \sqrt{\frac{Q^2 * B}{g * S^3}} \quad (3.8)$$

Určení režimu proudění jsme provedli na základě následující tabulky.

Proudění	Říční	Kritické	Bystřinné
Fr	<1	=1	>1

3.1 - Tabulka rozdělení režimů proudění

### 3.3.2 Rozdělení rychlostí po délce průřezu

Pro porovnání průměrných svislicových rychlostí po délce průřezu jsme použili metodu podle Velikanova vztahu (3.9). Ten udává, že střední svislicová rychlost je úměrná odmocnině z hloubky v daném místě. [5]

Průměrnou svislicovou rychlost získáme ze vztahu,

$$u_s = a * \sqrt{h} \quad (3.9)$$

kde součinitel  $a$  zůstává pro celý průřez konstantní a dá se vypočítat z rovnice průtoku,

$$\partial Q = u_s * h * \partial X \quad (3.10)$$

čímž dostaneme po integraci rovnice (3.10) podle souřadnice vzdálenosti od břehové hrany  $X$ ,

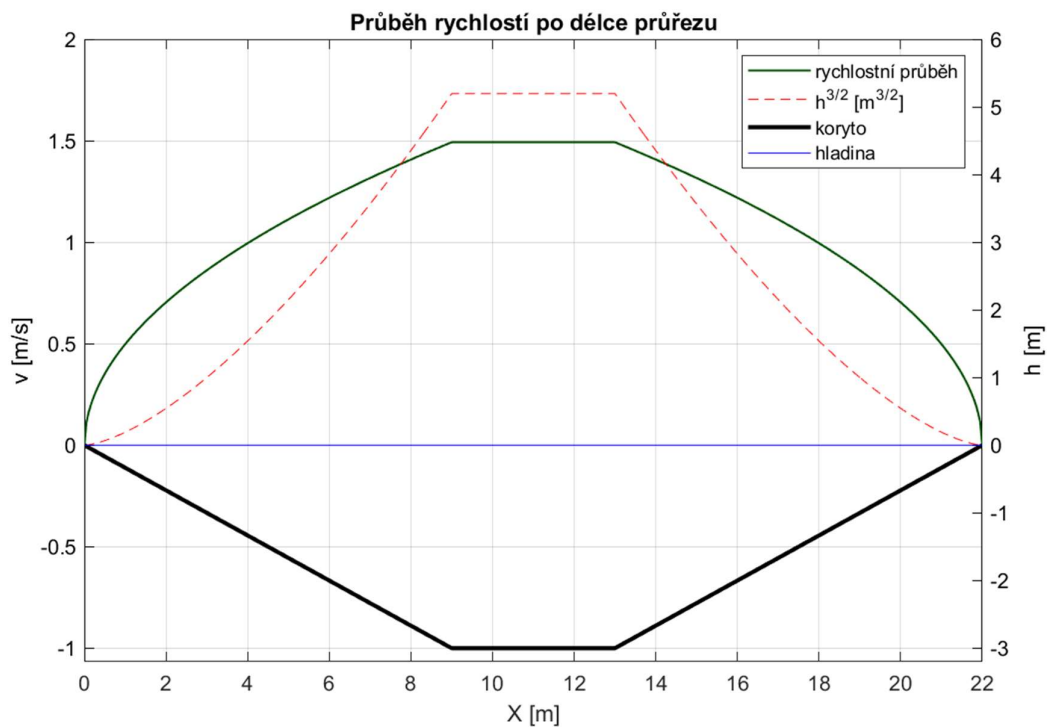
$$Q = a \int_0^X h^{\frac{3}{2}} \partial X \quad (3.11)$$

zde lze vyjádřit součinitel  $a$ ,

$$a = \frac{Q}{\int_0^X h^{\frac{3}{2}} \partial X} \quad (3.12)$$

což je hodnota velikosti plochy mezi hladinou a křivkou  $h^{3/2}$ . [5]

V grafu 3.1 jsou znázorněny výsledné průběhy hloubky, křivky  $h^{3/2}$  a rychlostí v každé pořadnici  $X$ .



3.1 - Graf průběhu průměrných svislicových rychlostí dle Velikanova vztahu



### 3.4 Výsledky jednorozměrného výpočtu

Z námi provedených výpočtů v tabulkovém procesoru Microsoft Excel jsme obdrželi referenční hodnoty pro kalibraci dvourozměrných modelů k programům HEC-RAS a SMS-FESWMS. Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce níže.

Číslo modelu	Šíře dna b [m]	Sklon dna $i_0$ [%]	Sklon břehů [1/m]	Drsnostní součinitel	Rychlost v [m/s]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	Froudovo číslo Fr [-]
1	4	0.1	3	0.035	1.29	50.14	0.31
2		0.5			2.88	112.13	0.69
3		1			4.07	158.57	0.97
4	10	0.1	4		1.39	91.47	0.32
5		0.5			3.1	204.54	0.71
6		1			4.38	289.27	1.00
7	20	0.1	3		1.54	134.26	0.33
8		0.5			3.45	300.22	0.73

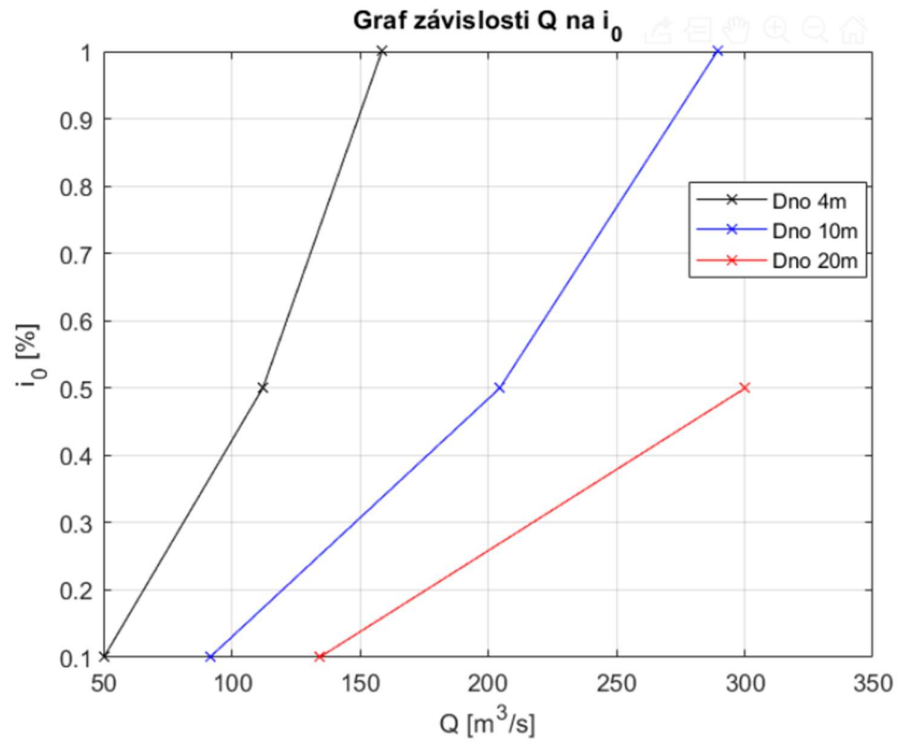
3.2 - Tabulka výsledků jednorozměrných výpočtů

Hodnota Froudova čísla se pohybovala v oblasti říčního proudění ve všech řešených modelech s výjimkou případu pro šíři dna 10 m a sklon toku 1,0 %, kde jsme dosáhli kritického proudění.

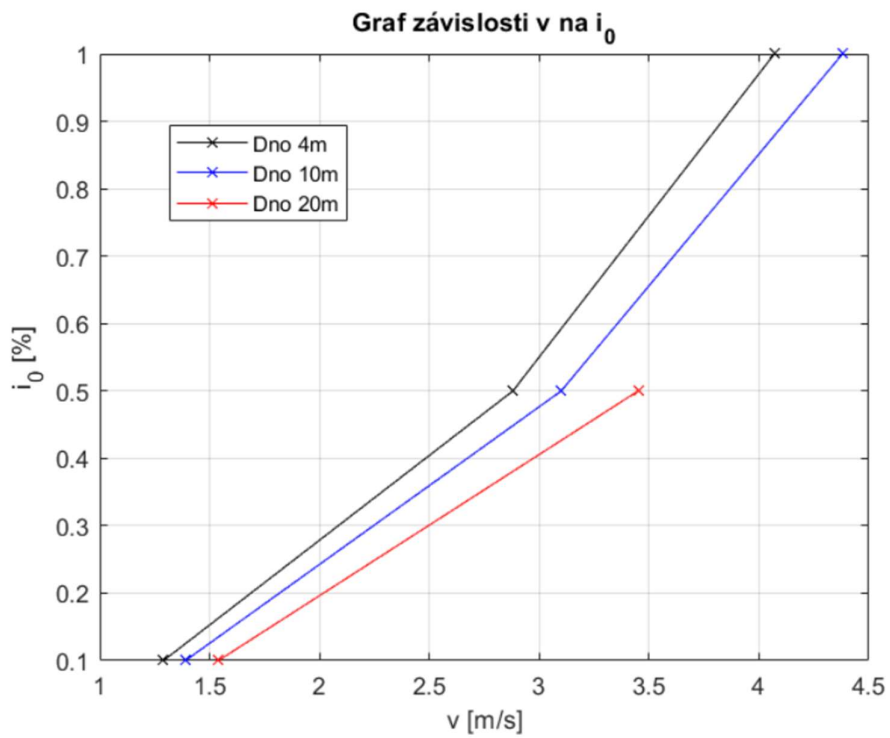
Z vypočtených údajů vyplývá, že s rostoucím sklonem koryta a s rozšiřujícím se dnem roste i hodnota průtoku (Graf 3.2).

Dále je z výsledných hodnot patrné, že se průměrné průřezové rychlosti v říčním korytě zvyšují jak s rozšiřujícím se tokem, tak se vzrůstajícím sklonem čáry energie, která má značný vliv na tyto průměrné průřezové rychlosti (Graf 3.3).

Příloha G obsahuje grafy závislosti průměrných svislicových rychlostí v závislosti na hloubce vody a sklonu koryta. Tyto průběhy jsme počítali dle Velikanova vztahu (3.9) a byly použity u konečného srovnání výpočetních modelů.



3.2 - Graf závislosti průtoku na sklonu toku



3.3 - Graf závislosti průřezové rychlosti na sklonu koryta

## 4 Výpočetní program HEC-RAS

Hydrotechnické výpočty programu HEC-RAS jsou založeny na numerické metodě vážených objemů. Ty popisují trojrozměrné proudění tekutin. V rámci modelu HEC-RAS jsou používány tzv. rovnice mělkých vod „ShallowWater“ (SV) ve kterých jsou k výpočtu použity zjednodušující předpoklady:

- a) Kapalina je nestlačitelná.
- b) V celém modelu je stejný hydrostatický tlak a neměnná hustota kapaliny.
- c) Turbulentní pohyb kapaliny je aproximován pomocí koeficientu příčného míchání „eddy viscosity transverse mixing coefficient“.
- d) Vektor rychlosti kapaliny ve svislém směru se předpokládá zanedbatelný oproti vodorovným složkám rychlosti, a tudíž se neuvažuje. [4]

K výpočtu můžeme použít dvě sestavy rovnic. První možností je použití plných momentových (Saint-Venantových) rovnic, které zahrnují do výpočtů vliv turbulentního chování kapaliny, toto řešení je možné použít u všech případů modelů, ale výpočty jsou poměrně časově náročné. Druhou možností je použití tzv. difúzních rovnic. Ty jsou při výpočtu výrazně méně náročné na výpočetní dobu, jsou stabilnější, ale lze je použít pouze za předpokladu vodních toků s malým podélným sklonem. Pohyb kapaliny je v takovém případě řízen pouze gravitačním působením a třecím odporem mezi dnem a kapalinou a vliv turbulentní kinematické viskozity se zanedbává. [4]

### 4.1 Řídící rovnice výpočtu

#### 4.1.1 Rovnice zachování hmotnosti (kontinuity)

Za předpokladu nestlačitelné kapaliny a zanedbání pohybu kapaliny ve vertikálním směru má zjednodušená rovnice kontinuity tvar,

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (4.1)$$

kde  $H$  náleží výšce od počátku souřadnicového systému,  $h$  je výška zatopené části,  $t$  je čas,  $u$  a  $v$  jsou složky vektoru rychlosti ve směru  $x$  a  $y$  a  $q$  je měrný průtok. [4]

Ve vektorové formě je rovnice dána vztahem,

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla * (hV) + q = 0 \quad (4.2)$$

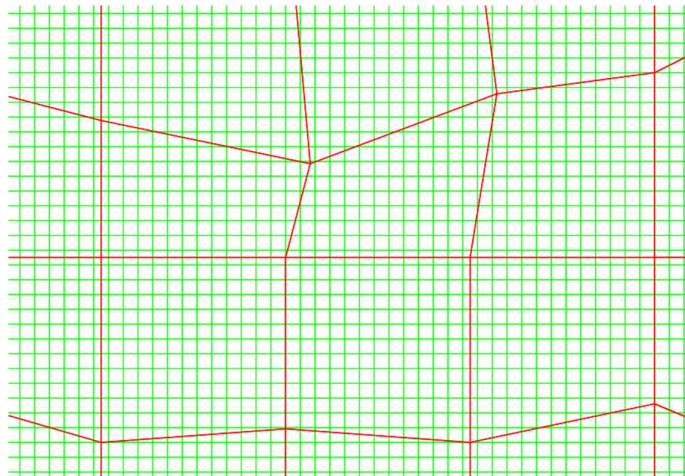
zde  $V$  je vektor rychlosti, a diferenciální operátor  $\nabla$  je vektor operátorů částečných derivací. [4]

Integrací přes rovinnou oblast s hraničním normálovým vektorem  $n$ , získáme použitím Gaussovy věty integrální rovnici ve tvaru,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \partial\Omega + \iint_S (V * n) dS + Q = 0 \quad (4.3)$$

zde  $\Omega$  představuje trojrozměrný prostor zaplněný kapalinou. Okrajové podmínky prvku jsou dány plochami  $S$ .  $Q$  zde vyjadřuje průtok, který prochází prostorem na povrchu (děšť, výpar) nebo na dně (průsak) řešené oblasti. [4]

Rovnice (4.3) poskytuje možnost výpočtu sítě vytvořenou z čtyřúhelníkových prvků, tzv. „sub-grid bathymetry“, kde každý prvek má své vlastní informace o povrchu potřebné k výpočtu. Komplikace mohou nastat, pokud bychom měli k výpočtu dostupnou velmi jemnou topografickou síť. V takovém případě je téměř nemožné volit prvky výpočtu stejně jemné (docházelo by k několikanásobnému prodloužení výpočetního času), jako je topografická síť, ale použijeme větší výpočetní mříž. Na obr. 4.1 je znázorněna podkladová topografická síť (zeleně) a větší výpočetní síť (červeně). [4]



4.1 - Obrázek výpočetní sítě

Z toho důvodu se do výpočtu zanáší chyby vzniklé zprůměrováním jednotlivých topografických elementů. [4]

Program HEC-RAS řeší tento problém tak, že přidá do prvku výpočetní sítě doplňující informace z menších elementů podkladu, jako jsou omočený obvod,

hloubka hladiny a zatopená plocha. Takto vzniklá výpočetní síť je připravena pro řešení numerickou metodou výpočtu. [4]

Pokud určíme pro každý prvek modelu výpočetní rovnici (4.3), můžeme trojný integrál představující objem elementu závislý na výšce vodní hladiny vyjádřit následovně:

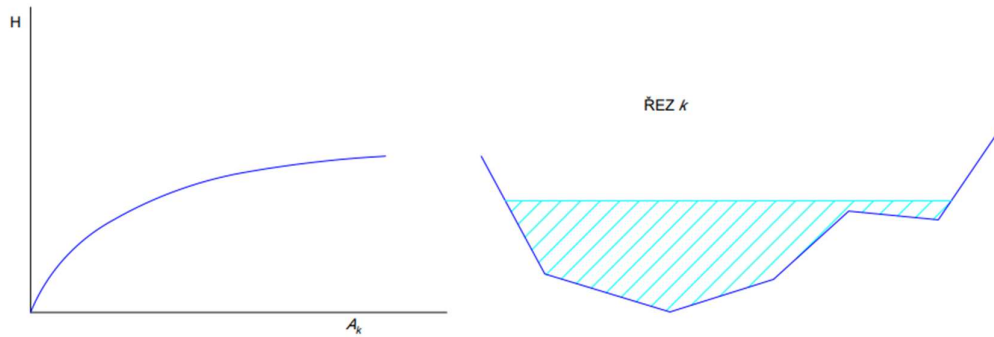
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega = \frac{\Omega_i^{n+1} - \Omega_i^n}{\Delta t} \quad (4.4)$$

Horní indexy patří jednotlivým časovým krokům a rozdíl mezi časovými kroky je  $\Delta t$ . [4]

Druhou část rovnice (4.3) můžeme vyjádřit za předpokladu polygonového prvku tvarem:

$$\iint_S (V * n) dS = \sum_k (V_k * n_k) A_k \quad (4.5)$$

$V_k$  a  $n_k$  představují průměrnou rychlost a jednotkový normálový vektor v řezu prvkem  $k$  a  $A_k = A_k(H)$  je funkce závislosti zatopené plochy vodní hladiny na výšce hladiny v řezu prvku. [4]



4.2 - Obrázek znázornění funkce  $A_k(H)$  a řezu  $k$

Pro jeden element výpočetní sítě lze tak z rovnice (4.3) substitucí rovnic (4.4) a (4.5) vyjádřit numerickou rovnici pro zachování hmotnosti následovně: [4]

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k (V_k * n_k) A_k + Q = 0 \quad (4.6)$$

#### 4.1.2 Rovnice zachování hybnosti (momentová rovnice)

Aplikací zjednodušujících předpokladů do Navier-Stokesových rovnic zachování hybnosti získá program HEC-RAS tzv. rovnice mělké vody „Shallow water“ ve tvaru:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (4.8)$$

$u$  a  $v$  představují rychlosti v Kartézských souřadnicích,  $g$  je gravitační zrychlení  $v_t$  je koeficient turbulentní viskozity,  $H$  náleží výšce hladiny od počátku souřadnicového systému,  $c_f$  je koeficient tření s dnovým povrchem a  $f$  je Coriolisův parametr. [4]

Takto danou rovnici lze vyjádřit ve vektorové podobě:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \overbrace{(V * \nabla V)}^b = - \overbrace{g \nabla H}^c + \overbrace{\frac{1}{h} \nabla * (v_t \nabla^2 V)}^d - \overbrace{c_f \vec{V}}^e + \overbrace{f k \times \vec{V}}^f \quad (4.9)$$

$v$  zde zastupuje tenzor turbulentní viskozity,  $\nabla$  je vektor diferenciálního operátoru daný vztahem  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)^T$  a  $k = (0,0,1)^T$  je vektor ve vertikálním směru. [4]

Každý člen rovnice ve vektorové podobě vyjadřuje jeden z fyzikálních dějů:

- Neustálené proudění
- Přenos proudových rychlostí
- Hydrostatický tlak – Pokud není hladina vodorovná, dojde vlivem tíhy kapaliny k jejímu pohybu.
- Turbulentní kinematická viskozita – Turbulence v kapalině je složitý jev, který není možné v dnešní době vyřešit diskrétním numerickým modelem, tudíž je dán popis turbulentního proudění gradientem procesu difúze a vyjadřuje jej následující rovnice:

$$v = D u_* h \quad (4.10)$$

$D$  je parametr směšovacího koeficientu zastupující víření kapaliny jak v podélném, tak v příčném směru, třecí rychlost určená vztahem:

$$u_* = \sqrt{g * R * S} \quad (4.11)$$

Parametr turbulentní viskozity vychází z empirických pozorování a může nabývat následujících hodnot:

<b>D</b>	<b>Intenzita míchání</b>	<b>Tvar a povrch</b>
<b>0,11 až 0,26</b>	slabé míchání	přímý tok, hladký povrch
<b>0,30 až 0,77</b>	střední míchání	mírné meandry, lehké povrchové nerovnosti
<b>2,0 až 5,0</b>	silné míchání	silné meandry, hrubý povrch

4.1 - Tabulka hodnot směšovacího koeficientu zastupující turbulentní chování kapaliny

Dnes je dostupná nová testovací verze HEC-RAS 6.x.x, ve které je nahrazen výpočet pomocí průměrného směšovacího koeficientu turbulentního chování kapaliny koeficienty turbulentního chování ve směru  $x$  a  $y$ .

- e) Dnové tření – Pro parametr dnového tření jsme používali vyjádření pomocí Manningova drsnostního součinitele daného vztahem:

$$c_f = \frac{n^2 * g * |V|}{R^{4/3}} \quad (4.12)$$

$n$  zastupuje Manningův drsnostní součinitel,  $g$  je gravitační zrychlení,  $|V|$  je velikost vektoru rychlosti a  $R$  je hydraulický poloměr.

- f) Coriolisův efekt – Zahrnuje vliv otáčení Země kolem své osy a je dán rovnicí:

$$f = 2\omega \sin \varphi \quad (4.13)$$

$\omega$  je úhlová rychlost otáčení Země a  $\varphi$  je zeměpisná šířka. Tento vliv se významně projeví jen při velkých tocích. V námi řešených modelech byl význam minimální, a proto jsme jej z výpočtů vynechali.

- g) Pro verzi 6.x.x je do výpočetní rovnice zahrnut parametr  $\tau_s$ , který zohledňuje vliv sil větru na proudění v toku. [4]

## 4.2 Difúzní vlnová aproximace do rovnic mělké vody

V případě, kdy v proudu toku převládají třecí síly mezi povrchem a kapalinou nad silami danými viskozitou kapaliny (velmi malý podélný sklon nebo velmi malá hloubka toku), získá se vztah mezi gradientem hydrostatického tlaku a třením kapaliny o dno. Vliv turbulentního chování kapaliny má zanedbatelný vliv a lze tak místo rovnic

hybnosti (4.7, 4.8) použít rovnicí difúzní vlny. Model zde může být řešen rovnicí známou jako difúzní vlnová aproximace mělké vody (4.17) „Diffusion Wave Approximation of Shallow Water equations“. [4]

V mělkém toku řízeném gravitačním odtokem a třecími silami lze zjednodušit rovnice hybnosti do tvaru:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} * \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (4.14)$$

$V$  je zde vektor rychlosti a  $R$  náleží hydraulickému poloměru. [4]

Pokud nahradíme rovnici zachování hmotnosti rovnicí difúzní vlny, zredukujeme soustavu rovnic na diferenciální formu rovnice difúzní vlny aproximovanou na mělké vody:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla * \beta \nabla H + q = 0 \quad (4.15)$$

$\beta$  je dána:

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}} \quad (4.16)$$

Rovnice difúzní vlny může být pak dosazena pro prvek sítě do rovnice kontinuity a získáme rovnici:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} - \sum_k \alpha \nabla H * n + Q = 0 \quad (4.17)$$

$\alpha$  je dána následujícím vztahem:

$$\alpha = \alpha(H) = \frac{(R(H))^{2/3} A_k(H)}{n|\nabla H|^{1/2}} \quad (4.18)$$

[4]

## 4.3 Tvorba modelu

### 4.3.1 Příprava souřadnic

Pro tvorbu modelu v programu HEC-RAS bylo nejdříve zapotřebí vytvořit digitální model terénu. Abychom jej mohli vytvořit, museli jsme připravit body povrchu v souřadnicích  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Pro naše modely prizmatických koryt stačilo vytvořit pouze lomové body.



Ke tvorbě souřadnicových bodů byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel, kde jsme vytvořili tabulku souřadnic pro tvorbu povrchu, jako je tato:

x	y	z
0	0	8
0	9	5
0	29	5
0	38	8
500	0	7.5
500	9	4.5
500	29	4.5
500	38	7.5

4.2 - Tabulka souřadnic pro tvorbu modelu terénu

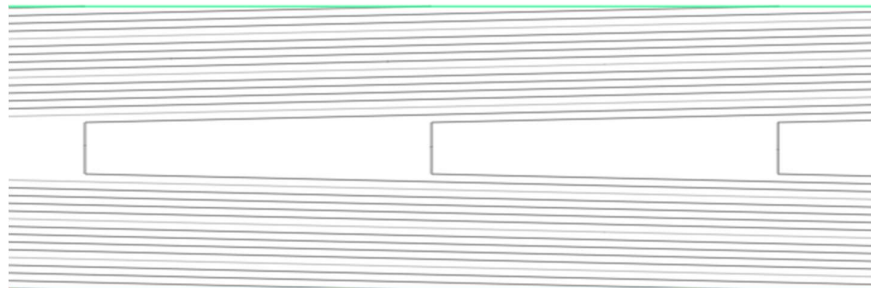
Z námi vytvořené tabulky jsme dále vyexportovali souřadnice do textového souboru. Tím byly připraveny pro použití ke tvorbě povrchu v programu Autocad Civil 3D.

### 4.3.2 Tvorba povrchu v programu Civil 3D

K vytvoření digitálního modelu terénu (DMT) pro program HEC-RAS byl použit program Autocad Civil 3D.

Ke tvorbě DMT jsme použili následující postup:

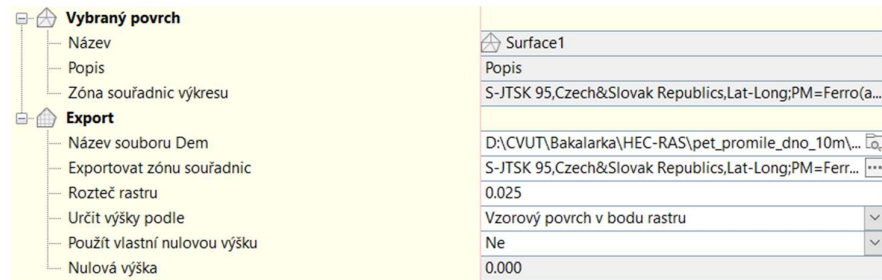
1. Vytvoření povrchu - V prostoru nástrojů jsme pod kartou „povrch“ zvolili možnost „Vytvořit povrch...“ a zadali jsme název povrchu.
2. Import souřadnic do vytvořeného povrchu – Po otevření záložky „definice povrchu“ na kartě „povrchy“, pod oddílem „Soubory bodů“ jsme zvolili možnost „přidat“ a vybrali jsme námi vytvořený textový soubor souřadnic. Takto vytvořený povrch vypadá následovně:



4.3 - Obrázek povrchu terénu v programu Civil 3D

Zde je zelenou čarou ohraničen vnější okraj povrchu a šedě jsou vyznačeny jeho vrstevnice.

3. Export DMT – Z programu lze povrchy vyexportovat přes tzv. digitální výškový model (DEM – Digital Elevation Model). To bylo provedeno přes kartu „povrchy“ pod možností „Exportovat do DEM...“. Po vyplnění údajů dle obr. 4.4 program vygeneroval potřebný digitální model terénu.

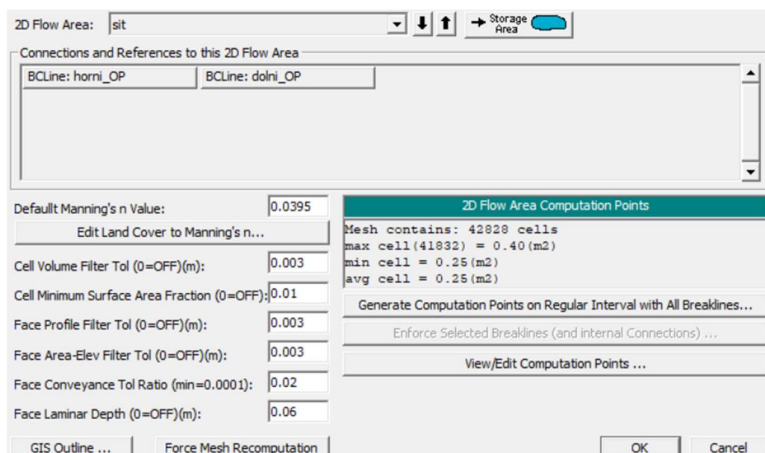


4.4 – Obrázek okna pro export DEM

### 4.3.3 Tvorba modelu v programu HEC-RAS

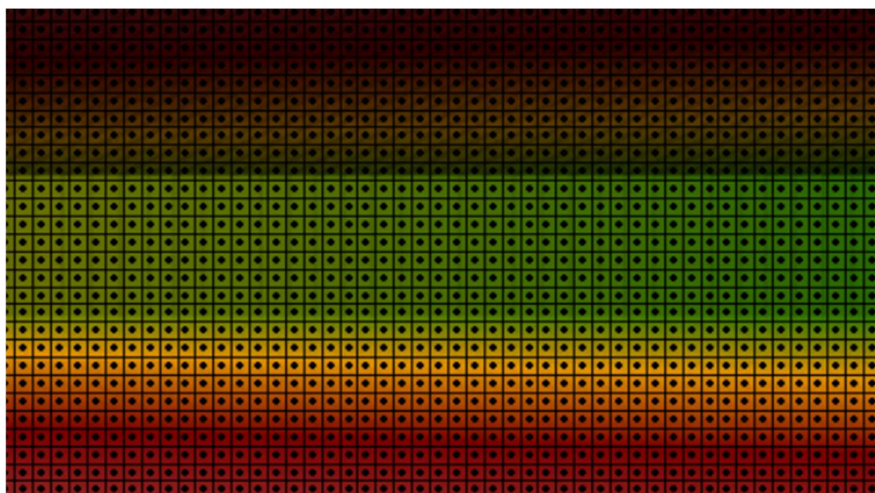
Na základě uživatelské příručky k programu HEC-RAS dostupného z <https://www.hec.usace.army.mil> jsme postupovali dle následujících kroků:

1. Tvorba terénu v prostředí RAS Mapper – K vytvoření DMT v programu HEC-RAS slouží modul RAS Mapper, ve kterém jsme pod kartou „Terrains“ zvolili možnost „Create a New RAS Terrain“. Následujícím krokem byl import připraveného DEM souboru z programu Civil 3D.
2. Tvorba výpočetní sítě – Z prostředí RAS Mapperu jsme se přesunuli do prostředí Geometric data, ve kterém jsme pod kartou „2D Flow Area“ vytvořili oblast výpočetní sítě.
3. Přiřazení vlastností výpočetní síti – K vytvořené výpočetní síti jsme po označení a zvolení možnosti „Edit 2D Flow Area“ získali následující rozhraní:



#### 4.5 - Obrázek prostředí vlastností výpočetní sítě

Zde bylo možné přiřadit drsnostní součinitel povrchu dle Manninga, mohli jsme zvolit velikost jednotlivých prvků výpočetní sítě a pod ikonou „GIS Outline“ zadat přesné hranice řešené oblasti. Vzniklá výpočetní síť byla z důvodu použití prizmatického koryta tvořena pravidelnými čtyřúhelníkovými prvky dle obr. 4.6.



#### 4.6 – Obrázek výpočetní sítě modelu HEC-RAS

4. Zadání okrajových podmínek – Dále bylo nutné vytvořit okrajové podmínky. Pod kartou „SA/2D Area BC Lines“ jsme připojili horní a dolní okrajové podmínky na vytvořenou síť.
5. Přiřazení vlastností okrajovým podmínkám – V prostředí „Unsteady Flow Data“ bylo na výběr z mnoha možností volby okrajových podmínek. Nami zvolené okrajové podmínky byly vždy:

- a. Horní OP – „Flow Hydrograph“, kde byl zadán průtok v daném čase výpočtu a také sklon čáry energie. Jelikož jsme prováděli výpočty pro ustálené proudění, byl zvolený průtok pro všechny časové kroky konstantní.
  - b. Dolní OP – „Stage Hydrograph“, kde jsme přiřadili každému časovému intervalu úroveň hladiny. Ta byla volena taktéž konstantní v úrovni kapacitního průtoku korytem.
6. Tvorba výpočetního plánu – V prostředí „Unsteady Flow Analysis“ jsme vybrali název pro daný výpočetní plán a nastavili způsob, jakým bude výpočet probíhat. Zde jsme pod kartou „Option“ v záložce „Calculation and Option Tolerances“ volili mezi dvěma způsoby výpočtu:
- a. Výpočet pomocí difúzní vlny – Program jej měl nastavený v základu a je vhodný při řešení mělkých toků.
  - b. Výpočet s použitím věty o hybnosti – Zde do výpočtu vstupuje parametr turbulentní kinematické viskozity, který zahrnuje do výpočtu vliv viskozity kapaliny.

#### 4.4 Výsledky výpočtu v HEC-RAS

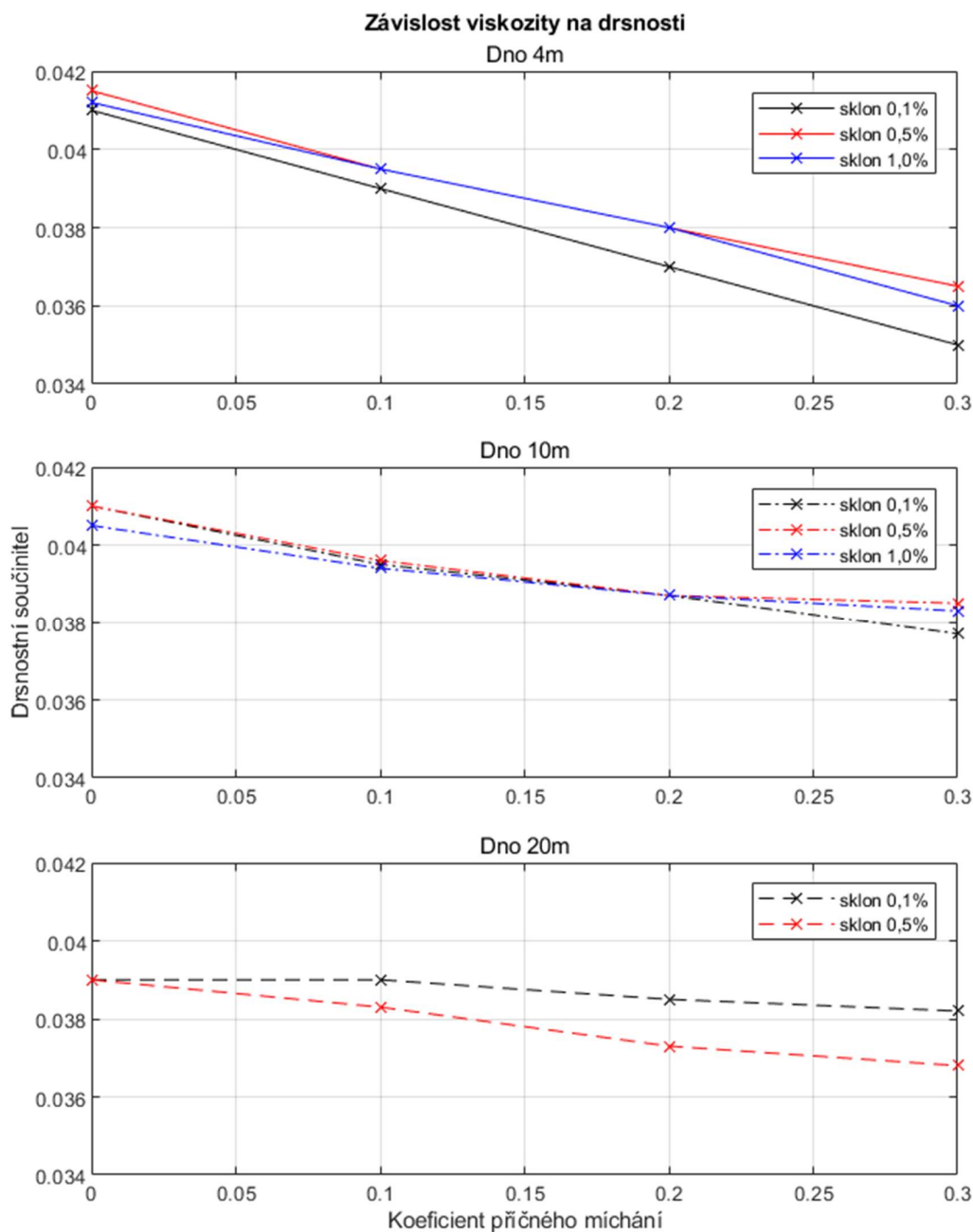
Na základě referenčních hodnot jednorozměrných výpočtů v tabulkovém editoru Microsoft Excel a DMT z programu Civil 3D byly vytvořeny dvourozměrné matematické modely v programu HEC-RAS. Výsledné hodnoty dvourozměrných výpočtů jsou uvedeny v příloze A.

Prostředí Ras Mapperu umožňuje přidat k DMT tzv. pozorovací profily, ve kterých máme možnost sledovat zjištěné ukazatele v jednotlivých časových krocích na rovnoměrně rozdělených úsecích. Pro zjištění chování proudění při změně koeficientu míchání, sklonu dna, šíři dna nebo břehových a dnových drsnostních součinitelů byl u každého modelu zřízen pozorovací příčný profil vždy v polovině koryta (na staničení 250 m při délce modelu 500 m). Hodnoty jednotlivých úseků jsme následně převedli do prostředí maticového editoru Matlab 2020b, ve kterém probíhalo následné zpracování dat.

#### **4.4.1 Závislost Manningova součinitele drsnosti na parametru kinematické viskozity vody**

Pro výpočty byly použité parametry turbulentní viskozity příčného mísení dle doporučených hodnot pro přímý tok s hladkým povrchem až do hodnot pro mírně meandrující koryto s lehkými povrchovými imperfekcemi (4.1 - Tabulka). Při pokusu spuštění výpočtu pro vyšší míru mísení kapaliny se program začal hroutit a nebylo možné provést další kroky. Dále výpočty probíhaly za použití rovnice difúzní vlny, kde se zanedbává turbulentní tření kapaliny a pohyb je závislý na gravitační síle a součiniteli drsnosti koryta.

Příloha A obsahuje výsledné průběhy drsnostních součinitelů v závislosti na koeficientu turbulentního chování kapaliny a průběhy při použití rovnic difúzní vlny. Tyto parametry jsou vyobrazeny pro každou šíři dna zvlášť (Graf 4.1, 4.2, 4.3).



4.1, 4.2, 4.3 - Grafy závislosti koeficientu příčného míchání na drsnostním součiniteli – HEC-RAS

V grafech 4.1 až 4.3 je nulová hodnota viskozity přiřazena řešení pomocí rovnice difúzní vlny. Z grafů 4.1 až 4.3 vyplývá, že při zvyšujícím se koeficientu turbulentní kinematické viskozity vody, musí docházet ke snižování Manningova drsnostního součinitele pro zajištění konstantního průtoku. Model se dnem o šíři 4,0 m je na změnu

koeficientu viskozity kapaliny nejnáchylnější (graf 4.1), naopak s rozšiřující se šířkou dna dochází ke srovnávání hodnot a drsnostní součinitele se přibližují k jejich průměru 0,035.

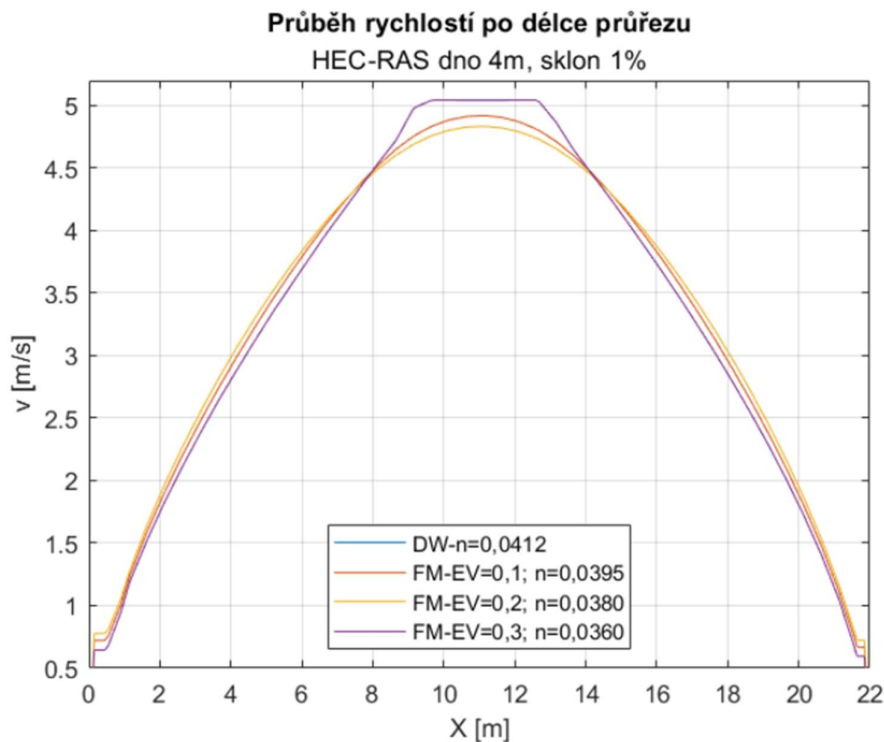
#### **4.4.2 Rozdělení rychlostí po průřezu**

Jak již bylo řečeno, program HEC-RAS používá při výpočtu a prezentaci výsledků průměrné svislicové rychlosti. Vliv na rozdělení rychlostního pole má především viskozita kapaliny, sklon čáry energie, hloubka vody a Manningův součinitel drsnosti. Průběh rychlostí v závislosti na koeficientu zohledňujícím viskozitu kapaliny pro program HEC-RAS je vyobrazen v grafech přílohy D. Rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku pro tento program je znázorněno na grafech přílohy F.

##### **4.4.2.1 Rozdělení rychlostí v závislosti na viskozitě kapaliny**

Příloha D obsahuje grafy rozdělení rychlostí při různých velikostech koeficientů zohledňujících viskozitu kapaliny pro modely se šíří ve dně 4,0, 10,0 a 20,0 m. Pro názornost byl vybrán k popisu graf 4.4, který vyobrazuje model o sklonu čáry energie 1,0 %, šířkou ve dně 4,0 m a sklonem břehů 1:3.

Z modelu vyplývá, že se zvyšujícím se koeficientem mísení při turbulentní viskozitě kapaliny se maximální rychlosti ve středu toku redistribuuují ke stranám modelu. V případě použití difúzní rovnice je zanedbána viskozita kapaliny a rychlosti se přibližují průběhu rozdělení dle Velikanova vztahu který řeší pouze pohyb vlivem gravitačních sil a hydraulického odporu koryta. V některých případech docházelo při výpočtu k opačnému jevu, kdy při vyšším parametru mísení kapaliny vycházel průběh rychlostí totožný s rozdělením rychlostí za použití aproximace pomocí rovnice difúzní vlny (graf 4.4 parametr viskozity 0,3). Nelze však hovořit o nahrazení momentových rovnic rovnicemi difúzní vlnové aproximace, poněvadž pro dosažení správné hodnoty průtoku při hloubce vody 3,0 m bylo zapotřebí snížit Manningův drsnostní součinitel.



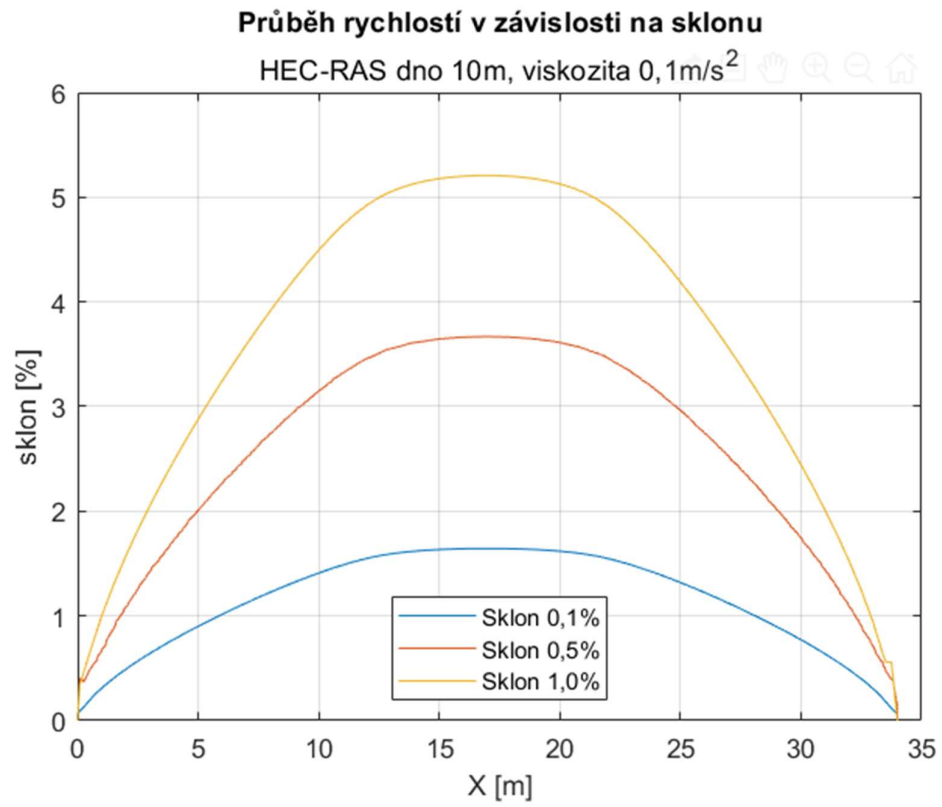
4.4 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na koeficientu mísení kapaliny pro dno 4,0 m v programu HEC-RAS

#### 4.4.2.2 Rozdělení rychlostí v závislosti na sklonu toku

Příloha F obsahuje grafy rozdělení rychlostí pro totožný koeficient mísení kapaliny, ale rozdílné sklony vodního toku. Jako názorný příklad je vybrán graf 4.5 pro model s parametrem mísení 0,1 a šířkou ve dně 10,0 m.

Je zde patrný prudký nárůst svislicových rychlostí s rostoucí hloubkou. Sklon břehů u tohoto modelu je 1:4, tudíž se při hloubce 3,0 m dosáhne dna na souřadnici  $X = 3 \times 4 = 12$  m. Do této části má růst rychlostí pro momentové rovnice parabolický charakter. Po dosažení maximální hloubky rostou rychlosti už jen velmi pozvolně až do středu modelu a poté se rychlosti snižují symetricky vůči jejich růstu.





4.5 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku pro dno 10 m v programu HEC-RAS

## 5 Výpočetní program SMS – FESWMS

### 5.1 SMS – Surface water modelling system

SMS je program sloužící k přípravě a následné prezentaci výsledků výpočetního modelu proudění povrchové vody. Zahrnuje jednorozměrné, dvourozměrné i trojrozměrné matematické modely řešící výpočty numerickou metodou konečných prvků a konečných diferencí. V rozhraní SMS jsou podporované následující moduly:

- a) Dvourozměrné modelování říčního proudění a ústí řek – RMA2, HIVEL2D a Flo2dh
- b) Trojrozměrné modely říčního proudění a ústí řek – RMA10 a CH3D
- c) Oceánské proudění – ADCIRC a M2D
- d) Fázové řešení vlnových modelů – CGWAVE a BOUSS2D
- e) Nefázové řešení vlnových modelů – RMA4 a SED2D-WES
- f) Jednorozměrný říční model – HEC-RAS

Bakalářská práce se zabývá použitím rozhraní FESWMS s výpočetním modulem Flo2dh. [6]

#### 5.1.1 FESWMS–2DH

FESWMS je model obsažený v programu SMS. Autorem modelu je David. C. Froehlich, který jej vyvinul ve Správě státních dálnic USA „Federal Highway Administration“. Zkratka FESWMS – Finite Element Surface-Water modeling System lze přeložit jako systém modelování vodního povrchu metodou konečných prvků. Výpočet probíhá v modulu Flo2dh – Depth-Averaged Flow Module, což lze přeložit jako modul s hloubkou zprůměrovanou velikostí průtoku. Modul řeší dvourozměrné ustálené i neustálené proudění vody s po výšce zprůměrovanými rychlostmi v toku. To je vhodné pro výpočet mělkých toků, poněvadž horizontální rychlosti značně převyšují vertikální, a proto lze vertikální rychlosti zanedbat. [7]

#### 5.1.2 Hydraulické rovnice

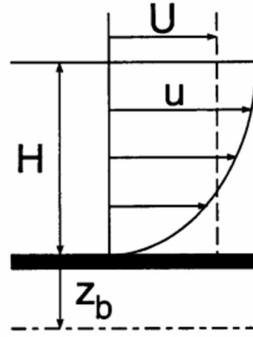
Řídící rovnice hydraulických výpočtů jsou založeny stejně jako v programu HEC-RAS na rovnicích zachování hmotnosti a hybnosti. V případě toků s tzv. mělkými vodami není zapotřebí popisovat trojrozměrný prostor, ale postačíme

si s průměrnými svislicovými velikostmi rychlostí toku a s vektory horizontálních rychlostí. Tyto rychlosti lze vyjádřit následujícími vztahy:

$$V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} v dz \quad (5.1)$$

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} u dz \quad (5.2)$$

Zde  $H$  je hloubka vody v daném elementu,  $u$  a  $v$  jsou horizontální rychlosti,  $z_b$  je výšková souřadnice povrchu a  $z_s$  je výšková souřadnice vodní hladiny. Graficky je to vyobrazeno na obr. 5.1. [7]



5.1 – Obrázek s hloubkou zprůměrované rychlosti

### 5.1.2.1 Rovnice zachování hybnosti

Za předpokladu zanedbání vertikálních složek rychlostí a zrychlení při použití s hloubkou zprůměrovaných rychlostí jsou vertikálně integrované rovnice hybnosti určeny vztahem:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta_{uu} HUU + (\cos \alpha_x \cos \alpha_z)^2 \frac{1}{2} gH^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{uv} HUV) + \cos \alpha_x gH \frac{\partial z_b}{\partial x} - \Omega HV + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_x)}{\partial y} \right] = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta_{vv} HVV + (\cos \alpha_y \cos \alpha_z)^2 \frac{1}{2} gH^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uv} HVU) + \cos \alpha_y gH \frac{\partial z_b}{\partial y} - \Omega HU + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (5.4)$$

$\beta$  členy vyjadřují korekci toku hybnosti (Boussinesqovo číslo), které jsou výsledkem integrace pohybových rovnic ve vertikálním směru:

$$\beta_{uu} = \frac{1}{HUU} \int_{z_b}^{z_s} uu \, dz \quad (5.5)$$

$$\beta_{vv} = \frac{1}{HVV} \int_{z_b}^{z_s} vv \, dz \quad (5.6)$$

$$\beta_{vu} = \beta_{uv} = \frac{1}{HUV} \int_{z_b}^{z_s} vu \, dz \quad (5.7)$$

Tyto koeficienty závisí na rozdělení rychlosti po výšce průřezu. Jelikož program používá zprůměrování velikosti rychlosti, vyjádří se vztah mezi rychlostí a výškou  $u$ :

$$u = \frac{\sqrt{c_f * U}}{\kappa} \log_e \left( \frac{z - z_b}{k} \right) \quad (5.8)$$

$c_f$  náleží součiniteli dnového tření,  $\kappa$  je von Karmanova konstanta a  $k$  je drsnostní součinitel. Boussinesqovo číslo pak můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\beta = 1 + \frac{c_f}{\kappa^2} \quad (5.9)$$

Program Flo2dh určuje Boussinesqovo číslo následovně:

$$\beta = \beta_0 + c_\beta c_f \quad (5.10)$$

Rovnice (5.9) a (5.10) jsou shodné, pokud dosadíme za  $\beta_0$  číslo 1, poté získáme dosazením rovnice (5.9) do (5.10) po úpravě:

$$c_\beta = \frac{1}{\kappa^2} \quad (5.11)$$

Karmanova konstanta je pro běžné případy rovna 0,4 a tudíž je parametr  $c_\beta$  roven 6,25. Program Flo2dh ale zanedbává vertikální složky rychlostí, proto  $c_\beta = 0$ . [7]

Coriolisův parametr  $\Omega$  zohledňuje vliv rotace země na proudění v toku a odpovídá:

$$2\omega * \sin \phi \quad (5.12)$$

Zde  $\omega$  zastupuje úhlovou rychlost otáčení země ( $7,27 \times 10^{-5}$  rad/s) a  $\phi$  úhel zeměpisné šířky. Pro námi modelované toky je tato hodnota zanedbatelná, a tudíž je z výpočtu vynechána. [7]

Tečná napětí na dně ve směru  $x$  a  $y$  jsou zahrnuta v rovnicích:

$$\tau_{bx} = \rho c_f m_b U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5.13)$$

$$\tau_{by} = \rho c_f m_b U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5.14)$$

$c_f$  je koeficient dnového tření počítán pro Chézyho rychlostní součinitel dle vztahu:

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (5.15)$$

Při použití Manningova drsnostního součinitele získáme součinitel  $c_f$  z následujícího vztahu:

$$c_f = \frac{gn^2}{\lambda^2 H^{1/3}} \quad (5.16)$$

Součinitel  $\lambda$  je použit pro převod jednotek z SI na U.S., a  $m_b$  je koeficient zohledňující sklon vodního toku:

$$m_b = \cos \alpha_z \quad (5.17)$$

Povrchová tečná napětí jsou závislá na rychlostech větru a jsou dána rovnicemi:

$$\tau_{sx} = c_s \rho_a W^2 \cos \psi \quad (5.18)$$

$$\tau_{sy} = c_s \rho_a W^2 \cos \psi \quad (5.19)$$

$\rho_a$  je hustota vzduchu  $W$  je velikost rychlosti větru 10 m nad hladinou,  $\psi$  úhel směru větru vzhledem k ose  $x$  a  $c_s$  je koeficient povrchového odporu počítán dle rovnice (5.20). [7]

$$c_s = \begin{cases} c_{s1} \times 10^{-3}; & \text{pokud platí } W \leq W_{min} \\ [c_{s1} + c_{s2}(W - W_{min})] \times 10^{-3}; & \text{pokud platí } W \geq W_{min} \end{cases} \quad (5.20)$$

V programu jsou nastaveny základní hodnoty pro  $c_{s1} = 1$  a  $c_{s2} = 0$  s rychlostí větru  $W = 0,0$  m/s. [7]

Vliv turbulentního proudění a dnového tření se počítá ve 2D proudění odděleně pomocí konceptu Boussinesqovy viskozity, který je dán rovnicemi:

$$\tau_{xx} = \rho \tilde{v}_{xx} \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (5.21)$$

$$\tau_{xyx} = \tau_{yx} = \rho \tilde{v}_{xx} \left( \frac{\partial UU}{\partial yx} + \frac{\partial VU}{\partial x} \right) \quad (5.22)$$

$$\tau_{yyxx} = \tau_{yx} = \rho \tilde{v}_{yyxx} \left( \frac{\partial VU}{\partial yx} + \frac{\partial VU}{\partial yx} \right) \quad (5.23)$$

Zde  $\tilde{v}_{xx}$ ,  $\tilde{v}_{xy}$ ,  $\tilde{v}_{yx}$  a  $\tilde{v}_{yy}$  představují parametry kinematické viskozity, které jsou v rámci programu Flo2dh izotropní ( $\tilde{v}_{xx} = \tilde{v}_{xy} = \tilde{v}_{yx} = \tilde{v}_{xx} = \tilde{v}$ ). Parametr  $\tilde{v}$  pro dnové tření se vypočítá ze vztahu:

$$\tilde{v} = (0,6 \pm 0,3)U_*H \quad (5.24)$$

A pro turbulentní proudění se počítá následovně:

$$\tilde{v} = \tilde{v}_o + c_\mu U_*H \quad (5.25)$$

Průtok je popsán řídicí rovnicí kontinuity ve tvaru: [7]

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = q \quad (5.26)$$

### 5.1.3 Metoda vážených reziduí

Program Flo2dh má způsob výpočtu založený na metodě vážených reziduí s aplikací Galerkinovy metody řešení numerickou metodou. Ta se skládá ze dvou základních kroků. [7]

Prvním krokem je určení obecného chování funkční závislé proměnné tak, aby bylo možné splnit řídicí diferenciální rovnici a rovnice okrajových podmínek s dostatečně malou chybovostí. Při nahrazení závislé proměnné do řídicích rovnic s vysokou pravděpodobností dojde k chybě zvané reziduum a výsledné řešení je pouze přibližné. Řešení získáme vyžádáním nulového rezidua po zprůměrování na celé oblasti řešení. Druhým krokem výpočtu je vyřešení zbytkové (chybové) rovnice integrováním přes celou oblast řešení a výslednou integraci položit rovnou nule. [7]

Postup lze popsat podle následujících rovnic:

$$Lu - f = 0 \quad (5.27)$$

$L$  je diferenciální operátor,  $u$  je závislá proměnná a  $f$  je známá funkce. Závislou proměnnou určíme přibližně ze vztahu:

$$u \approx \tilde{u} = \sum_{i=1}^n N_i * C_i \quad (5.28)$$

$\tilde{u}$  je proměnná definovaná neznámými parametry  $C_i$  a množinou funkcí  $N_i$ . Pokud  $\tilde{u}$  dosadíme do rovnice 5.27 místo  $u$  je nepravděpodobné, že budou obě strany rovnice shodné. Výsledný rozdíl označíme symbolem  $\varepsilon$  a nazýváme jej reziduem. [7]

$$Lu - f = \varepsilon \quad (5.29)$$

Způsob, jakým můžeme minimalizovat chybovost, je vytvoření průměru z  $\varepsilon$  a určit, že při integrování přes celou řešenou oblast bude hodnota rovna nule. Výsledný vztah vyjádříme takto:

$$\int_R W_i \varepsilon dR = 0; \text{ pro } i = 1, 2, \dots, m \quad (5.30)$$

$R$  náleží oblasti řešení,  $W_i$  je lineárně nezávislá váhová funkce. Tím jsou určeny váhové funkce a zbývá vyřešit množinu  $m$  aproximačních (současně probíhajících) rovnic pro  $C_i$  neznámých. Získáme tak přibližné hodnoty pro závislé proměnné  $u$  použitím rovnice 5.28. [7]

Při Galerkinově metodě využíváme stavu, kdy derivace aproximační funkce je rovna váhové funkci. Takto zvolená aproximace je dána vztahem:

$$\int_R N_i (\partial \tilde{u} - f) dR = 0; \text{ pro } i = 1, 2, \dots, m \quad (5.31)$$

Po zadání interpolačních funkcí  $N_i$  lze rovnici explicitně vyhodnotit a najít řešení běžným způsobem. [7]

## 5.2 Tvorba modelu

### 5.2.1 Příprava souřadnic

Při tvorbě modelu byly použity již vytvořené souřadnice k programu HEC-RAS.

### 5.2.2 Tvorba povrchu v programu SMS

Povrch v programu SMS jsme vytvořili následujícím postupem:

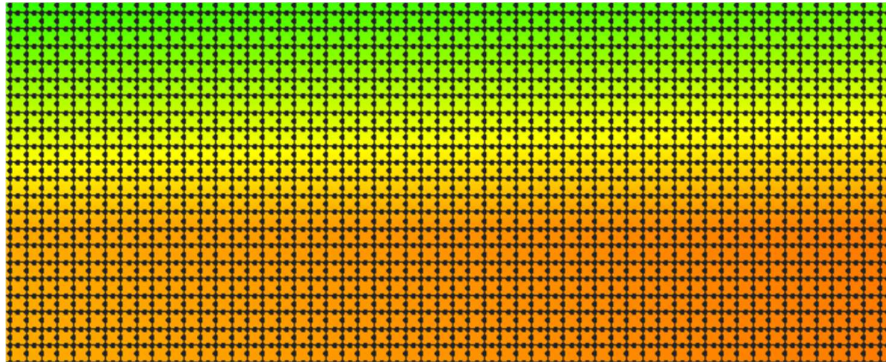
1. Import souřadnic – Přes kartu „File“ a záložku „open“ jsme postupně nahráli nástrojem „Import Wizard“ textový soubor se souřadnicemi v podobě výškových bodů „Scatter Set“ a hlavních bodů „Feature Points“ výpočetní sítě modelu.
2. Tvorba výpočetní sítě – Další postup byl proveden v „Map modulu“, kde jsme příkazem vytvořit hlavní hrany „Create Feature Arc“ spojili jednotlivé hlavní body a měli jsme tak vytvořen model určený lomovými hranami a hlavními body.

Poté bylo třeba vytvořit vedlejší body ležící na lomových hranách. K tomu slouží příkaz „Redistribute Verticals“ pod kartou „Feature Objects“. Zde jsme zvolili odstupovou vzdálenost dle velikosti požadovaných výpočetních elementů (Spacing: 0,5m).

Vytvoření sítě prvků se provedlo příkazem „Build Polygons“ na kartě „Feature Objects“. Program má primárně nastavenou tvorbu

trojúhelníkových prvků. Jelikož srovnávací modely měly přímý tvar koryta s lichoběžníkovým průřezem, bylo vhodné zvolit čtyřúhelníkovou výpočetní síť.

3. Převod do Mesh modulu – Příkazem „Map to Mesh“ jsme vygenerovali výpočetní síť prvků. Další úprava již probíhala v „Mesh modulu“.
4. Přiřazení výškové souřadnice – Vzniklé výpočetní síti zbývalo přiřadit výškové souřadnice. Ve „Scatter modulu“ jsme příkazem „Interpolate to mesh“ pod kartou „Scatter“ získali výškové souřadnice z.



5.2 – Obrázek výpočetní sítě - FESWMS

5. Tvorba okrajových podmínek - Tvorba probíhala v prostředí „Mesh modulu“. Příkazem „create nodestring“ jsme ve zvoleném místě přiřadili okrajové podmínky. Další možností je již v „map modulu“, pod záložkou „Feature Objects“, příkazem „Attributes“ určit okrajovou podmínku pro námi zvolený úsek vybráním příkazu „Boundary conditions“. Po vytvoření úseků bylo nutné zadat příkazem „Assign BC“ pod záložkou FESWMS hodnoty okrajových podmínek (výši hladiny a velikost průtoku).
6. Přiřazení vlastností povrchu - Materiálové vlastnosti byly voleny na kartě „FESWMS“ pod záložkou „Material properties“, kde se volil Manningův součinitel drsnosti a parametr turbulentní kinematické viskozity vody.
7. Nastavení plánu výpočtu - Před zahájením výpočtu se pod kartou „FESWMS“ v záložce „model control“ musely určit parametry výpočtu (výchozí hladina, vysychání prvků, hustota vzduchu, počet iteračních kroků a jejich velikost). Tím byl program připraven k výpočtu.

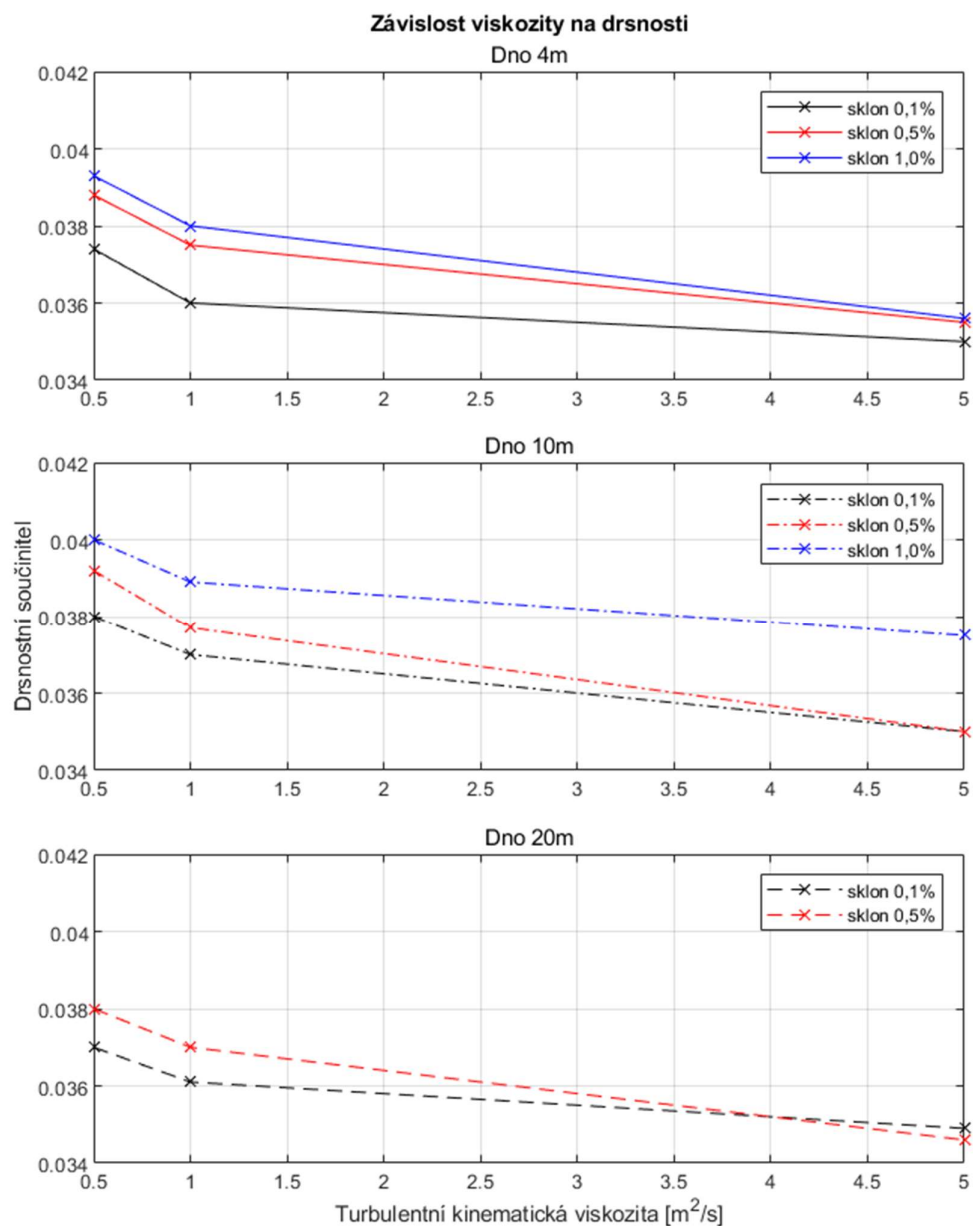


## **5.3 Výstupy výpočtů**

### **5.3.1 Závislost Manningova drsnostního součinitele na parametru základní kinematické turbulentní viskozity kapaliny**

U programu SMS-FESWMS jsme vycházeli při stanovení parametru základní kinematické turbulentní viskozity z hodnoty nastavené programem  $5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ . V případě výpočtů pro tuto hodnotu byl program nestabilní a výsledné rozdělení rychlostí po průřezu poukazovalo na vyšší viskozitu kapaliny, než je typické pro běžné říční toky na našem území. Při dalších výpočtech se proto použil parametr základní kinematické turbulentní viskozity v hodnotách  $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$  a  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Příloha B obsahuje tabulku výsledných závislostí parametru základní kinematické turbulentní viskozity na sklonu dna, šíři dna a Manningově součiniteli drsnosti. Vztah mezi základní kinematickou turbulentní viskozitou kapaliny a Manningovým drsnostním součinitelem při různých šířích dna a různých sklonech čáry energie je vyobrazen na grafu 5.1-5.3.



### 5.1, 5.2, 5.3 Grafy závislosti kinematické viskozity na Manningově součiniteli drsnosti - FESWMS

Pokud se zaměříme na změnu součinitele drsnosti při zužování širě dna vodního toku, uvidíme zde tendenci snižování součinitele drsnosti při zachování stejné hodnoty průtoku. Dalším ukazatelem, který vyplývá z grafů 5.1-5.3 je snižování Manningova drsnostního součinitele s rostoucím parametrem kinematické viskozity kapaliny. Při pohledu na změnu Manningova drsnostního součinitele v závislosti na sklonu toku zde

uvidíme tendenci zvyšování se tohoto parametru s rostoucím sklonem. Toto chování se projevuje nejvíce při nízké kinematické viskozitě kapaliny, jelikož s rostoucí viskozitou se dané hodnoty součinitele drsnosti přibližují.

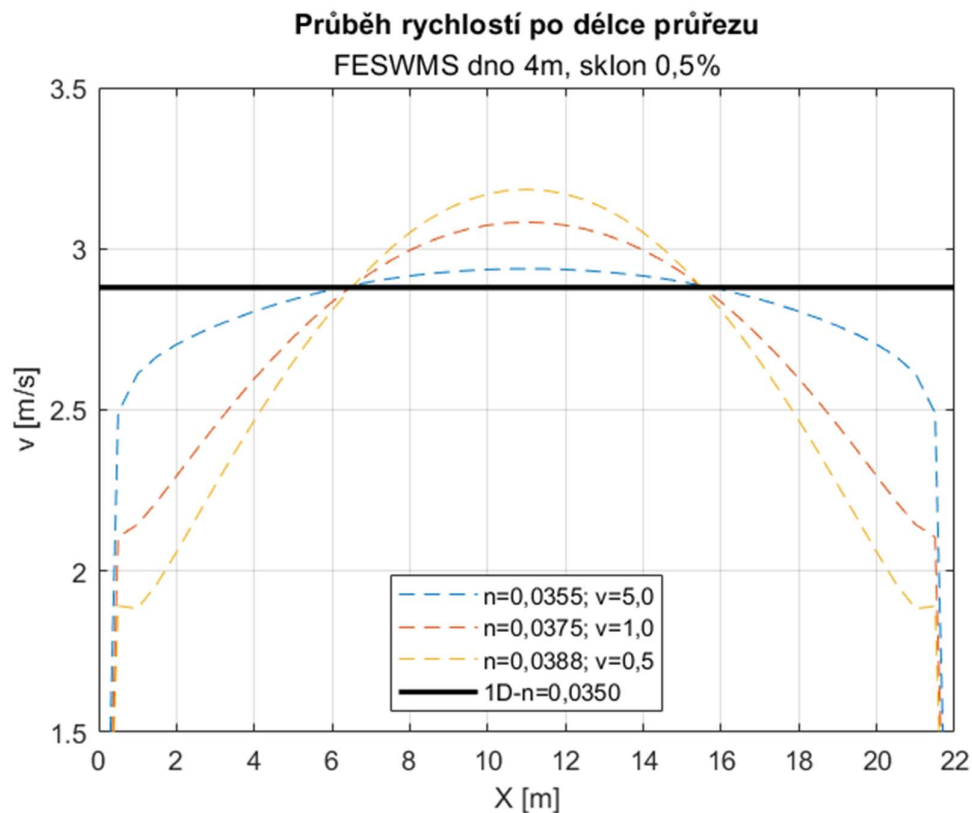
### **5.3.2 Rozdělení rychlostí po průřezu**

Program SMS-FESWMS používá při výpočtu stejně jako program HEC-RAS průměrné svislicové rychlosti. V programu Matlab 2020b byly postupně zpracovány pro všechny vytvořené modely výsledky průběhů rychlostních polí v závislosti na parametru viskozity (Příloha C) a v závislosti na sklonu toku (Příloha E).

#### **5.3.2.1 Rozdělení rychlostí v závislosti na viskozitě kapaliny**

Příloha E obsahuje grafy rozdělení rychlostních polí po délce průřezu koryta pro všechny napočítané modely. Pro ilustraci zde popíšeme model o šíři dna 4,0 m a sklonem 0,5 % (Graf 5.4).

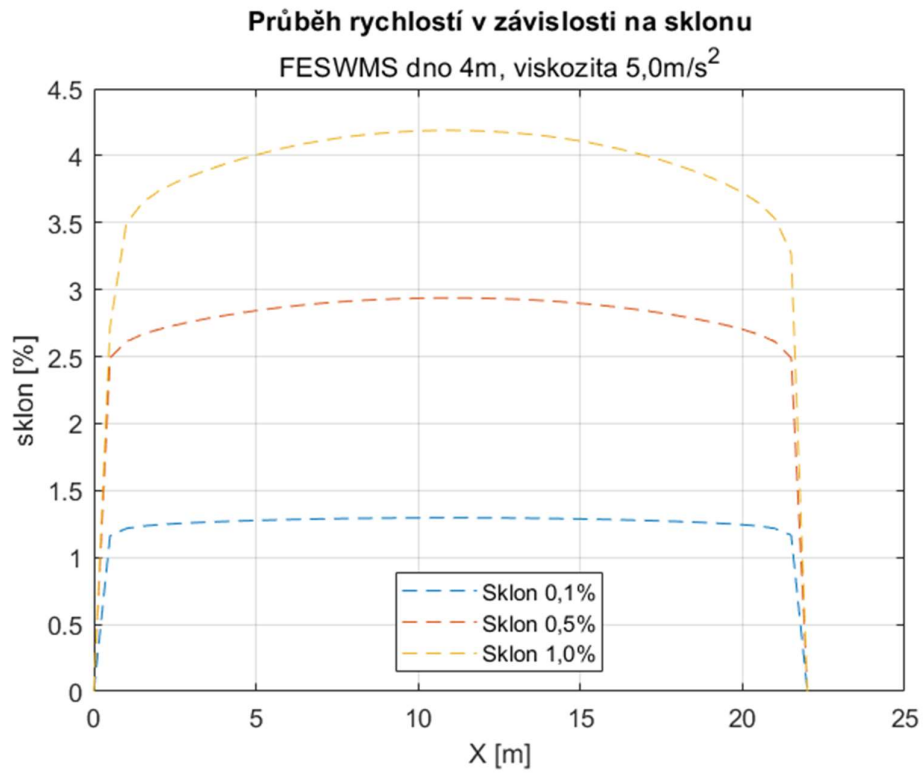
Obdobně jako v případě programu HEC-RAS se i zde při navyšování parametru základní turbulentní kinematické viskozity postupně snižují průměrné svislicové rychlosti ve středu koryta, a naopak se zvyšují rychlosti v blízkosti břehových hran. Dále si zde můžeme povšimnout skutečnosti, že všechny průběhy rychlostí se protínají ve dvou bodech. Pokud tyto dva body spojíme, získáme přímkou na pozici průměrné průřezové rychlosti celého koryta, což odpovídá jednorozměrným výpočtům.



5.4 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na parametru viskozity kapaliny v programu FESWMS

### 5.3.2.2 Rozdělení rychlostí v závislosti na sklonu toku

Pokud se podíváme na graf 5.5 s průběhem rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku, můžeme pozorovat, že při základním programem nastaveném parametru kinematické viskozity kapaliny dochází téměř k dokonalé redistribuci rychlostí u modelu se sklonem 0,1 %. Při prozkoumání zbylých dvou modelů se zde vyskytuje trend soustředění vyšších rychlostí ve středu toku, který nabývá na významu s rostoucím sklonem vodního toku. Zbylé grafy (Příloha E) vykazují stejné tendence přerozdělování rychlostí po průřezu jako námi vybraný graf 5.5, přičemž s klesající hodnotou základní kinematické turbulentní viskozity kapaliny je soustředění rychlostí ve středu vodního toku čím dál více patrné.



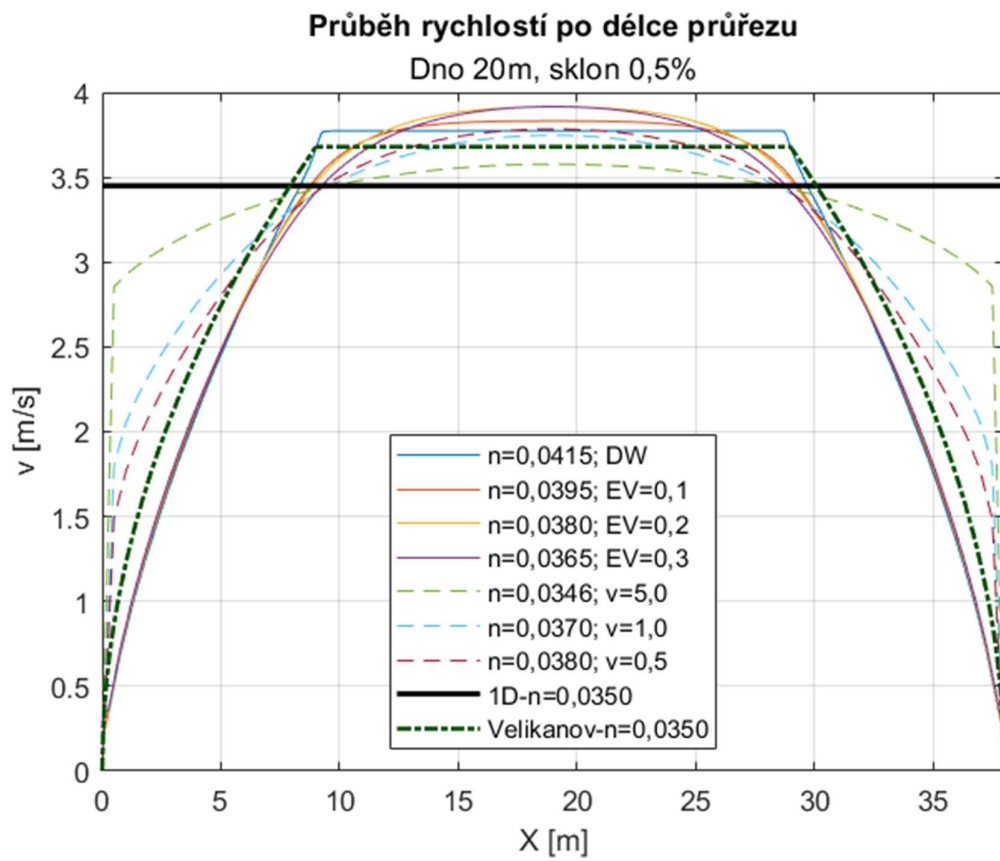
5.5 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku pro model se šíří ve dně 4,0 m - FESWMS

## 6 Porovnání rychlostních polí

Příloha H obsahuje porovnání jednotlivých rychlostních polí všech vytvořených matematických modelů pro programy FESWMS (čárkovanou čarou) a HEC-RAS (plnou čarou) a dále obsahuje teoretické rozdělení rychlostí v závislosti na hloubce podle Velikanova vztahu (čerchovanou čarou) a průměrnou průřezovou rychlost získanou jednorozměrným výpočtem.

Graf 6.1 vyobrazuje průběhy rychlostí pro model se šíří dna 20 m a sklonem toku 0,5 %. Program HEC-RAS má rychlostní průběhy po délce průřezu koryta velmi podobné při použití námi zvolených koeficientů mísení pro případ řešení pomocí momentové rovnice. Pokud pohlédneme na výsledek za použití výpočtu pomocí difúzní vlny, je zde dle očekávání patrná největší podobnost s výpočtem dle Velikanova vztahu, avšak pro dosažení podobného průběhu bylo zapotřebí přiřadit korytu drsnostní součinitel ve výši 0,0415 oproti předpokládanou 0,0350.

Program FESWMS měl základní, programem nastavenou hodnotu viskozity poměrně vysokou. Z toho důvodu vychází ovlivnění rychlostí v závislosti na velikosti hloubky nejméně patrné a blíží se průměrně průřezové rychlosti. Se snižujícími se parametry viskozity kapaliny dochází k přiblížení rozdělení průběhu podle Velikanova vztahu.



6.1 - Graf porovnání rychlostních polí po průřezu

## 7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit sadu dvourozměrných matematických modelů prizmatických koryt lichoběžníkového průřezu a následně porovnat výsledky výpočtů v programech SMS s modulem FESWMS a HEC-RAS oproti jednorozměrným výpočtům. Výpočty probíhaly ve všech případech pro hloubku toku 3,0 m, referenční součinitel drsnosti koryta 0,035 a kapacitní průtok.

Program SMS s modulem FESWMS používal dvourozměrný matematický model založený na metodě konečných prvků, přičemž samotný výpočet probíhal v programu Flo2dh při použití numerické metody řešení pomocí vážených reziduí. Program HEC-RAS používal taktéž dvourozměrný matematický model založený na metodě konečných prvků, avšak oproti modulu FESWMS zde byla při výpočtech používána metoda konečných objemů.

Výsledky v modulu FESWMS a programu HEC-RAS závisely především na použití Manningova drsnostního součinitele a dále viskozitě kapaliny a sklonu čáry energie. Viskozita kapaliny je v programu HEC-RAS zastoupena pomocí koeficientu příčného míchání pro turbulentní kinematickou viskozitu a v programu FESWMS je vyjádřena pomocí parametru základní kinematické turbulentní viskozity.

U porovnávání závislostí mezi Manningovým součinitelem drsnosti, koeficientem míchání, sklonem čáry energie a šířkou koryta v programu HEC-RAS jsme dospěli závěru, že pro zachování totožné úrovně hladiny jako v případě jednorozměrných výpočtů je nutné navyšovat Manningův součinitel drsnosti. Pokud používáme výpočty pomocí difúzních rovnic, je nutné u toků se šíří dna v řádech jednotek metrů navýšit hodnotu součinitele drsnosti o přibližně 17-19 %. Při použití momentových rovnic je v závislosti na koeficientu mísení nutno navýšit hodnoty součinitele drsnosti přibližně o 11-14 % pro hodnotu 0,1, 6-8 % pro 0,2 a o 0-3 % pro 0,3 (příloha A). S rozšiřujícím se tokem a klesajícím sklonem toku se zmenšuje rozdíl mezi součinitelem drsnosti získaným jednorozměrným výpočtem a výstupem výpočtu z programu. Např. u toku se sklonem 0,5 % a šíří dna 20 m je při použití rovnice difúzní vlny navýšena hodnota součinitele drsnosti pouze o 11 %.

V programu SMS-FESWMS při porovnání závislostí Manningova součinitele drsnosti na základní kinematické turbulentní viskozitě kapaliny, šíří dna a sklonu toku



vyplývalo, že při nízkých sklonech toku a vysokém parametru základní kinematické viskozity se Manningův součinitel drsnosti blíží předpokládaným hodnotám jednorozměrných výpočtů (příloha B). Naopak při nízkém parametru základní kinematické viskozity kapaliny je nutné Manningův součinitel drsnosti značně navyšovat pro zachování konstantní úrovně hladiny. Tento jev je ještě více patrný u toků s vysokým sklonem čáry energie a širí dna v jednotkách metrů (grafy 5.1-5.3). Např. u toku se sklonem 1,0 %, základním parametrem viskozity  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  a širí dna 4,0 m je nutné navýšit hodnotu součinitele drsnosti o 12 %, kdežto při hodnotě parametru viskozity  $5,0 \text{ m}^2/\text{s}$  je součinitel drsnosti větší pouze o 2 %.

Při porovnávání jednotlivých vypočtených modelů s rychlostním rozdělením po délce průřezu dle Velikanova vztahu vykazoval nejpodobnější výsledky program HEC-RAS s využitím rovnice difúzní vlny. Za vhodnější výsledky pro všechny řešené modely lze považovat výpočty s použitím momentové rovnice, jelikož zahrnují do výpočtu turbulentní chování kapaliny. Program SMS-FESWMS se ukázal jako vhodný při použití parametrů základní kinematické viskozity  $0,5$  a  $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ , avšak při pohledu na vypočtené rychlostní pole ze základní programem nastavené hodnoty  $5,0 \text{ m}^2/\text{s}$  se ukázalo, že viskozita je příliš vysoká a samotný program se při výpočtech často hroutil.

## 8 Seznam zkratek a symbolů

$a$	Součinitel dle Velikanova [-]
$A_k$	Plocha zatopeného prvku [ $m^2$ ]
$b$	Šířka dna [m]
$B$	Šíře hladiny [m]
$c_f$	Parametr dnového tření [-]
$c_s, c_{s_1}, c_{s_2}$	Koeficient povrchového odporu [-]
$c_\beta$	Koeficient korekce hybnosti [-]
$C$	Chézyho rychlostní součinitel [ $m^{0.5}/s$ ]
$D$	Parametr směšovacího koeficientu [-]
EV	Eddy viscosity – Turbulentní viskozita
$f$	Coriolisův parametr [-]
FESWMS	Finite element surface water modeling system
Fr	Froudovo číslo [-]
$g$	Gravitační konstanta [ $9,81 m/s^2$ ]
$h$	Hloubka koryta [m], hloubka vody [m]
H	Výše hladiny od počátku souřadnicového systému (HEC-RAS) [m]
	Hloubka vody (FESWMS) [m]
HEC – RAS	Hydrologic engineering center – river analysis system
$i_e$	Sklon čáry energie [-]
$i_0$	Sklon dna [-]
$k$	Drsnostní součinitel [-]
$L$	Diferenciální operátor
$m$	Sklon břehu [-]
$m_b$	Koeficient sklonu toku [-]
$n$	Manningův drsnostní součinitel [-]
$n_k$	Jednotkový normálový vektor [-]
O	Omočený obvod [m]
$q$	Měrný průtok [ $m^3/s/bm$ ]
Q	Průtok [ $m^3/s$ ]

R	.....	Hydraulický poloměr [m]
S	.....	Plocha zatopené části průřezu koryta [m <sup>2</sup> ]
SW	.....	Shallow Water
SMS	.....	Surface modelling system
t	.....	Čas [s]
u	.....	Složka vektoru rychlosti ve směru y [m/s]
u <sub>s</sub>	.....	Průměrná svislicová rychlost [m/s]
u*	.....	Třecí rychlost u dna [m/s]
v	.....	Rychlost proudění vody [m/s],
	.....	Složka vektoru rychlosti ve směru x [m/s]
V	.....	Vektor rychlosti (program HEC-RAS) [m/s]
V	.....	Velikost vektoru rychlosti [m/s]
U, V	.....	Průměrné svislicové rychlosti (program SMS) ve směru x a y [m/s]
V <sub>k</sub>	.....	Průměrná průřezová rychlost [m/s]
W	.....	Vektor rychlosti větru [m/s]
W <sub>i</sub>	.....	Lineárně nezávislá váhová funkce
X	.....	Vzdálenost od břehu [m]
x, y, z	.....	Kartézské souřadnice [m]
z <sub>b</sub>	.....	Výšková souřadnice dna toku [m]
z <sub>s</sub>	.....	Výšková souřadnice hladiny [m]
α	.....	Coriolisovo číslo [-]
α <sub>x</sub> , α <sub>y</sub> , α <sub>z</sub>	.....	Koeficienty směrů proudění
β	.....	Boussinesqovo číslo [-]
β <sub>uu</sub> , β <sub>vv</sub> , β <sub>uv</sub>	.....	Členy korekce toku hybnosti [-]
β <sub>0</sub>	.....	Konstanta [-]
κ	.....	Karmanova konstanta [-]
ρ	.....	Hustota vody [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>a</sub>	.....	Hustota vzduchu [kg/m <sup>3</sup> ]
τ <sub>bx</sub> , τ <sub>by</sub>	.....	Dnové tečné napětí ve směru x a y [Pa]
τ <sub>sx</sub> , τ <sub>sy</sub>	.....	Tečné napětí na povrchu hladiny ve směru x a y [Pa]
τ <sub>xx</sub> , τ <sub>xy</sub> , τ <sub>yx</sub> , τ <sub>yy</sub>	.....	Tečná napětí vlivem turbulence [Pa]

$\nu$ .....	Kinematická viskozita kapaliny [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\tilde{\nu}$ .....	Izotropní s hloubkou zprůměrovaný parametr viskozity kapaliny [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\tilde{\nu}_0$ .....	Modelová konstanta kinematické turbulentní viskozity kapaliny [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\nabla$ .....	Vektor diferenciálního operátoru
$\Omega$ .....	Prostor zaplněný objemem kapaliny (HEC-RAS)
.....	Koriolisův parametr (FESWMS)
$\omega$ .....	Úhlová rychlost [ $\text{rad}/\text{s}$ ]
$\varphi$ .....	Zeměpisná šířka [ $\text{rad}$ ]
$\psi$ .....	Úhel mezi směrem větru a kladnou osou x [ $\text{rad}$ ]
$\partial$ .....	Symbol parciální derivace
$\lambda$ .....	Součinitel pro převod jednotek [-]
$\varepsilon$ .....	Reziduum [-]

## 9 Citovaná literatura

[1] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. User's Manual for FESWMS FST2DH. 09/2002 aktualizace 10/2003.

[2] HAVLÍK, Vladimír aj. Matematické modelování neustáleného proudění. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00764-2.

[3] HAVLÍK, Aleš. Matematické modelování proudění vody s volnou hladinou. [Online prezentace] ČVUT. V Praze: Inovace bakalářského programu Stavební inženýrství pro posílení profesního zaměření absolventů [cit. 2016-04-10]. Dostupný z: <https://docplayer.cz/1837043-Matematicke-modelovani-proudeni-vody-s-volnou-hladinou.html>.

[4] MAŇÁK, Pavel. Manningův drsnostní součinitel [online] ČVUT. V Praze Copyright © [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/YRIM/Seminarni\\_prace+prezentace/2017/seminarni\\_%20prace/MA%C5%87%C3%81K\\_sou%C4%8Dinitel\\_n.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/YRIM/Seminarni_prace+prezentace/2017/seminarni_%20prace/MA%C5%87%C3%81K_sou%C4%8Dinitel_n.pdf)

[5] PATOČKA, Cyril. Hydraulika - 2. část. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 403-33223.

[6] RESEARCH, BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY – Environmental Modeling. Surface-water Modeling System (SMS) version 8.1. 10/2004.

[7] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS – River Analysis System – Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. 02/2016

## 10 Seznam příloh

Příloha A - Výstup výpočtů z programu HEC-RAS	55
Příloha B - Výstup výpočtů z programu FESWMS	56
Příloha C - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity - FESWMS	57
Příloha D - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity – HEC-RAS	59
Příloha E - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – FESWMS	61
Příloha F - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – HEC-RAS	64
Příloha G - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – Velikanov	67
Příloha H - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – sloučené grafy	68

# 11 Seznam obrázků, grafů a tabulek

## *Seznam obrázků*

3.1 - Obrázek průřezu profilu koryta	13
4.1 - Obrázek výpočetní sítě	18
4.2 - Obrázek znázornění funkce $A_k(H)$ a řezu $k$	19
4.3 - Obrázek povrchu terénu v programu Civil 3D	23
4.4 – Obrázek okna pro export DEM	24
4.5 - Obrázek prostředí vlastností výpočetní sítě	25
4.6 – Obrázek výpočetní sítě modelu HEC-RAS	25
5.1 – Obrázek s hloubkou zprůměrované rychlosti	33
5.2 – Obrázek výpočetní sítě - FESWMS	38

## *Seznam Grafů*

3.1 - Graf průběhu průměrných svislicových rychlostí dle Velikanova vztahu	14
3.2 - Graf závislosti průtoku na sklonu toku	16
3.3 - Graf závislosti průřezové rychlosti na sklonu koryta	16
4.1, 4.2, 4.3 - Grafy závislosti koeficientu příčného míchání na drsnostním součiniteli – HEC-RAS	28
4.4 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na koeficientu mísení kapaliny pro dno 4,0 m v programu HEC-RAS	30
4.5 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku pro dno 10 m v programu HEC-RAS	31
5.1, 5.2, 5.3 Grafy závislosti kinematické viskozity na Manningově součiniteli drsnosti - FESWMS	40
5.4 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na parametru viskozity kapaliny v programu FESWMS	42
5.5 - Graf rozdělení rychlostí po délce průřezu v závislosti na sklonu toku pro model se šíří ve dně 4,0 m - FESWMS	43
6.1 - Graf porovnání rychlostních polí po průřezu	45

### ***Seznam tabulek***

3.1 - Tabulka rozdělení režimů proudění	13
3.2 - Tabulka výsledků jednorozměrných výpočtů	15
4.1 - Tabulka hodnot směšovacího koeficientu zastupující turbulentní chování kapaliny	21
4.2 - Tabulka souřadnic pro tvorbu modelu terénu	23



## Příloha A - Výstup výpočtů z programu HEC-RAS

– hloubka vody pro všechny modely  $h = 3,0$  m

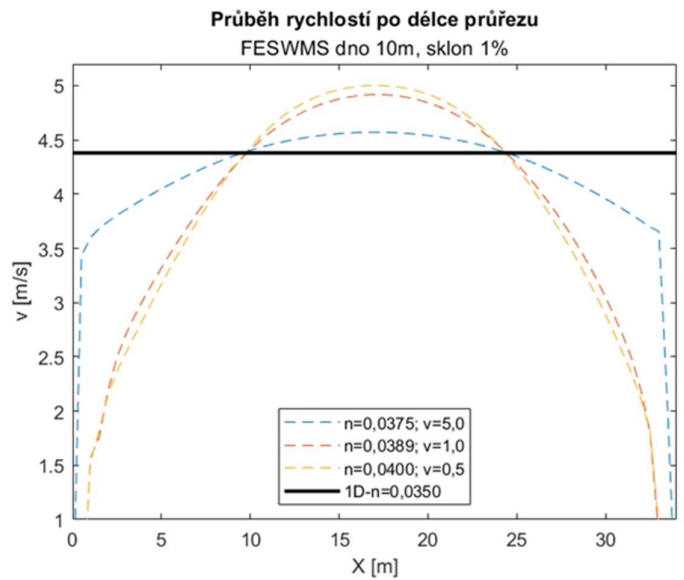
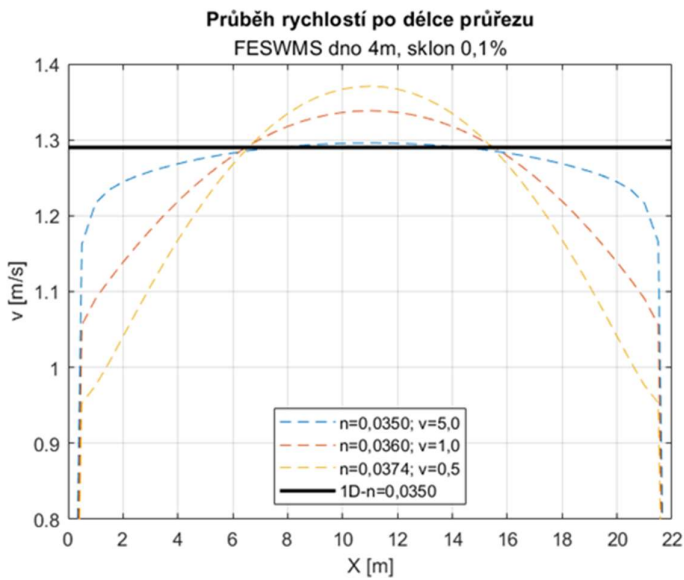
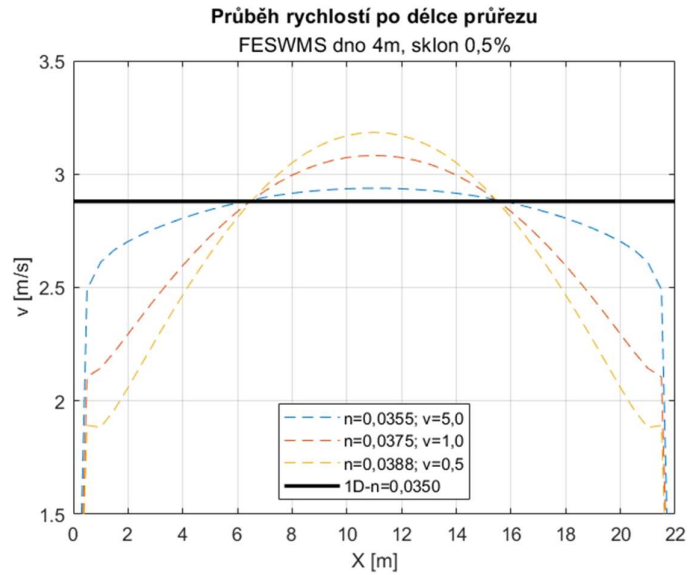
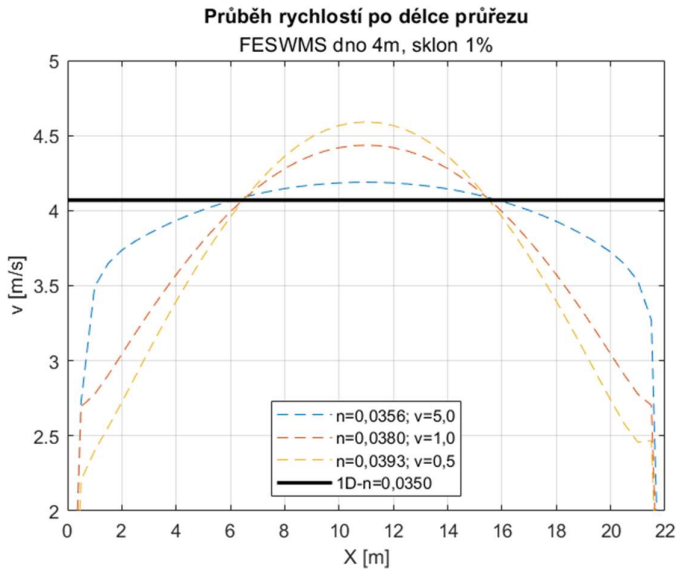
Číslo modelu	Šíře dna b [m]	Sklon dna $i_0$ [%]	Sklon břehů [1/m]	Součinitel drsnosti	Koeficient míchání [-]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]
DW	4	0.1	3	0.0410	0.00	50.14
FM 0.1				0.0390	0.10	
FM 0.2				0.0370	0.20	
FM 0.3				0.0350	0.30	
DW		0.5		0.0415	0.00	112.13
FM 0.1				0.0395	0.10	
FM 0.2				0.0380	0.20	
FM 0.3				0.0365	0.30	
DW		1.0		0.0412	0.00	158.57
FM 0.1				0.0395	0.10	
FM 0.2				0.0380	0.20	
FM 0.3				0.0360	0.30	
DW	10	0.1	4	0.0410	0.00	91.47
FM 0.1				0.0395	0.10	
FM 0.2				0.0387	0.20	
FM 0.3				0.0377	0.30	
DW		0.5		0.0410	0.00	204.54
FM 0.1				0.0396	0.10	
FM 0.2				0.0387	0.20	
FM 0.3				0.0385	0.30	
DW		1.0		0.0405	0.00	289.27
FM 0.1				0.0394	0.10	
FM 0.2				0.0387	0.20	
FM 0.3				0.0383	0.30	
DW	20	0.1	3	0.0390	0.00	134.26
FM 0.1				0.0390	0.10	
FM 0.2				0.0385	0.20	
FM 0.3				0.0382	0.30	
DW		0.5		0.0390	0.00	300.22
FM 0.1				0.0383	0.10	
FM 0.2				0.0373	0.20	
FM 0.3				0.0368	0.30	

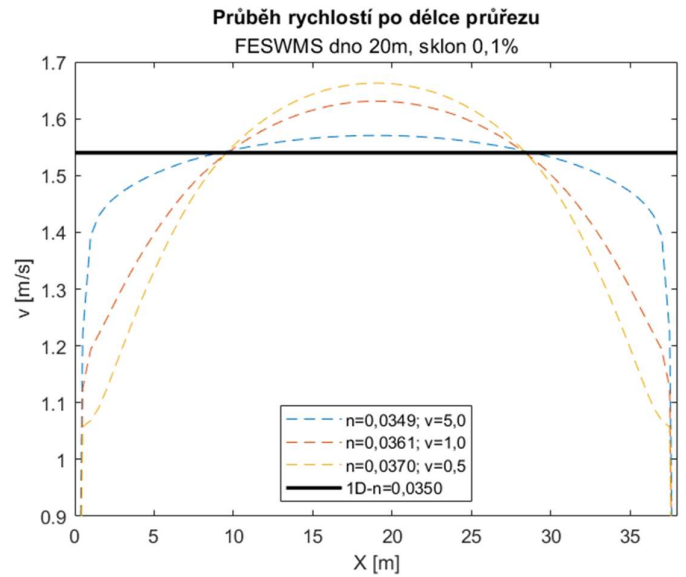
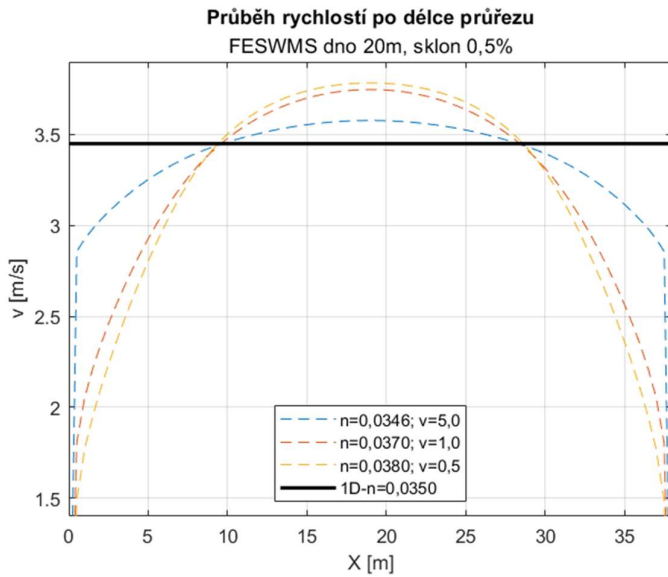
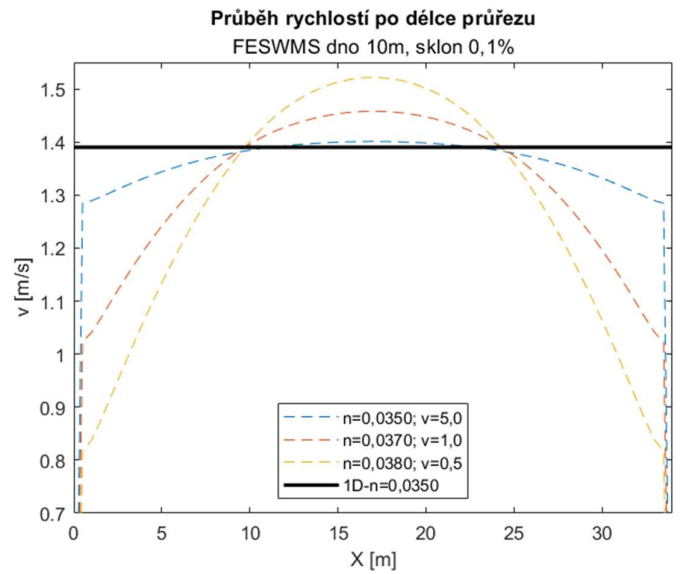
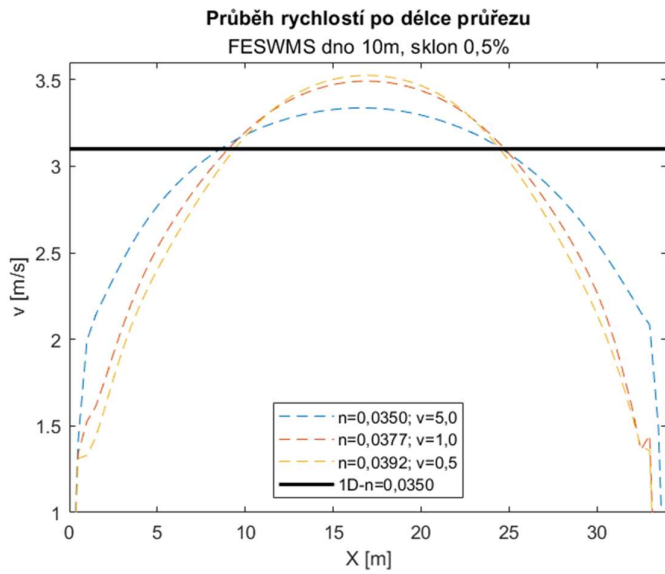
## Příloha B - Výstup výpočtů z programu FESWMS

– hloubka vody pro všechny modely  $h = 3,0$  m

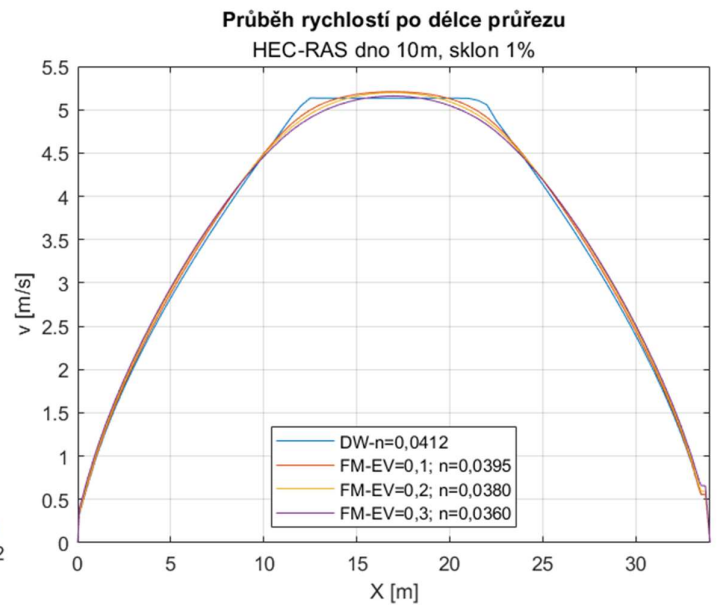
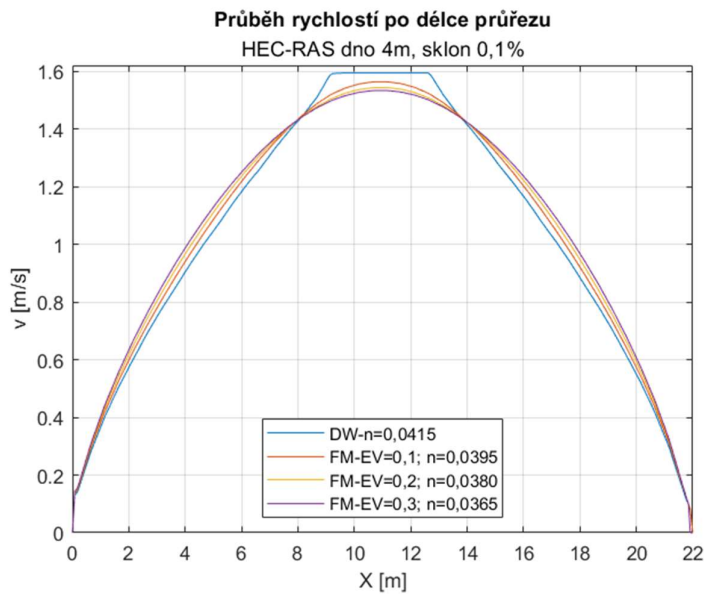
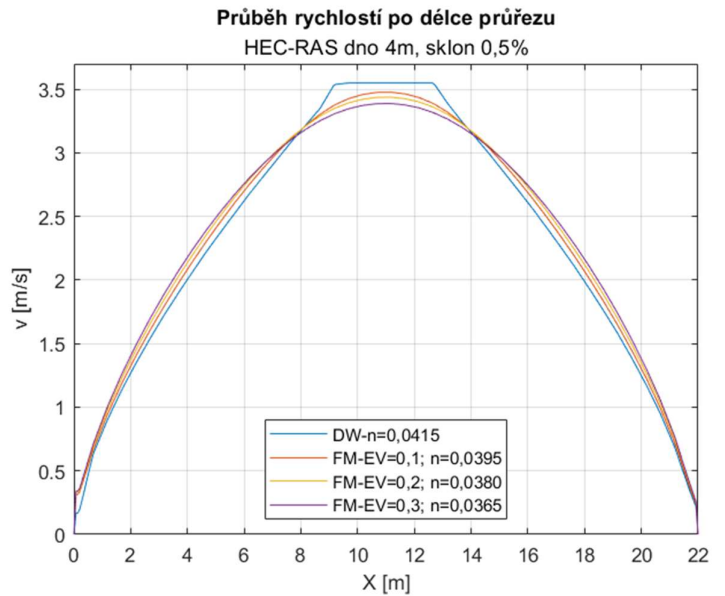
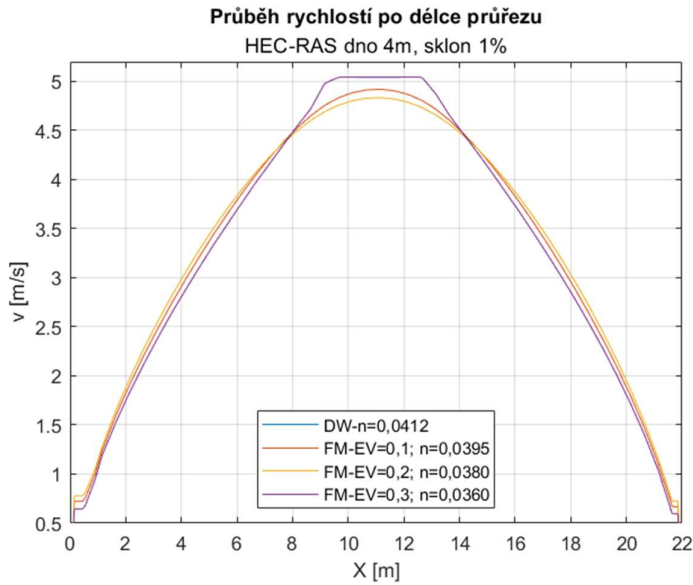
Číslo modelu	Šíře dna $b$ [m]	Sklon dna $i_0$ [%]	Sklon břehů [1/m]	Součinitel drsnosti	Turbulentní parametr [m <sup>2</sup> /s]	Průtok [m <sup>3</sup> /s]
1	4	0.1	3	0.0374	0.5	50.14
2		0.1		0.0360	1.0	
3		0.1		0.0350	5.0	
4		0.5		0.0388	0.5	112.13
5		0.5		0.0375	1.0	
6		0.5		0.0355	5.0	
7		1.0		0.0393	0.5	158.57
8		1.0		0.0380	1.0	
9		1.0		0.0356	5.0	
10	10	0.1	4	0.0380	0.5	91.47
11		0.1		0.0370	1.0	
12		0.1		0.0350	5.0	
13		0.5		0.0392	0.5	204.54
14		0.5		0.0377	1.0	
15		0.5		0.0350	5.0	
16		1.0		0.0400	0.5	289.27
17		1.0		0.0389	1.0	
18		1.0		0.0375	5.0	
19	20	0.1	3	0.0370	0.5	134.26
20		0.1		0.0361	1.0	
21		0.1		0.0349	5.0	
22		0.5		0.0380	0.5	300.22
23		0.5		0.0370	1.0	
24		0.5		0.0346	5.0	

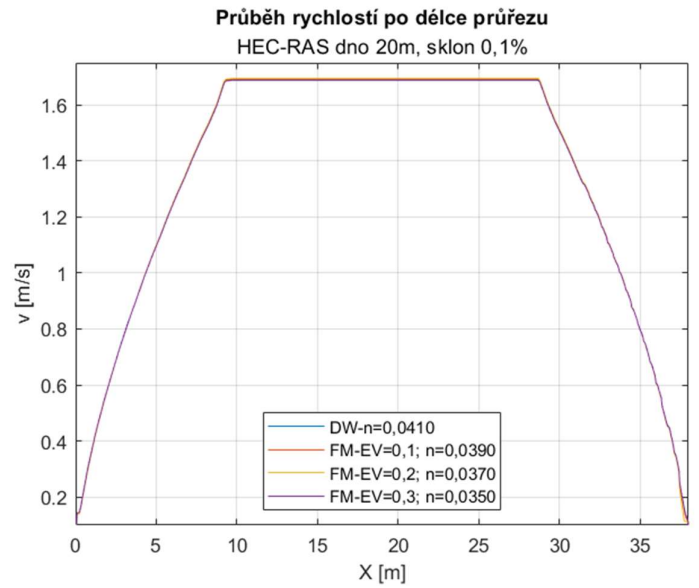
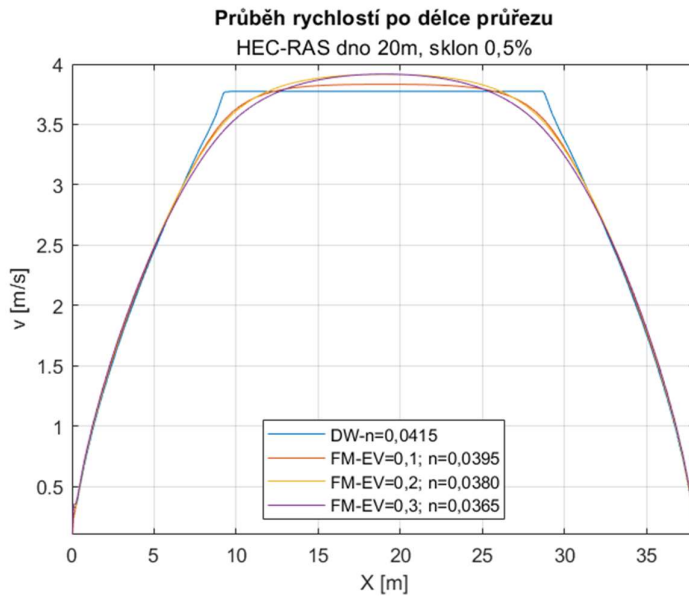
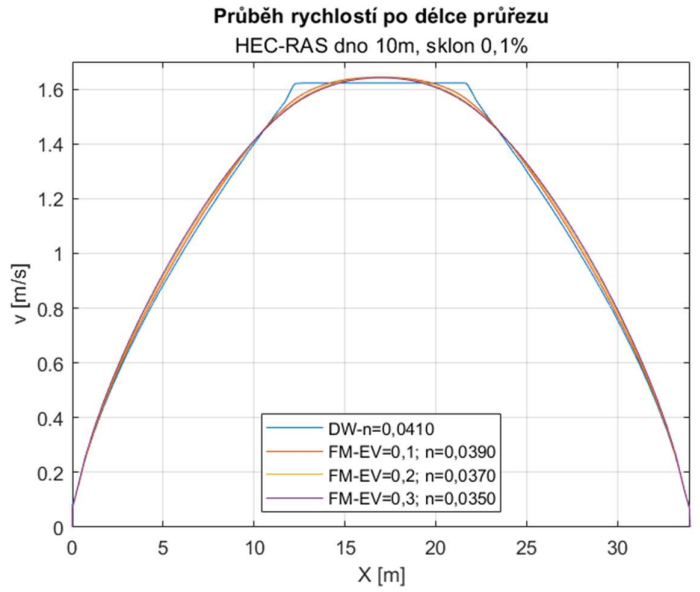
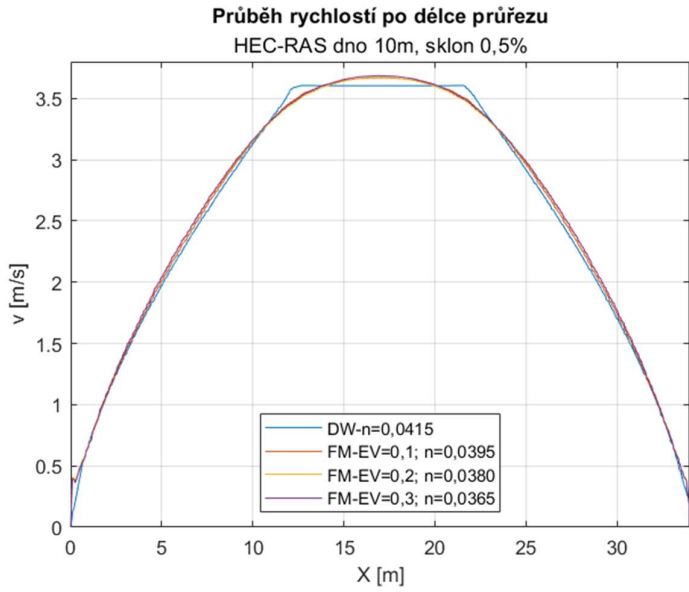
# Příloha C - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity - FESWMS



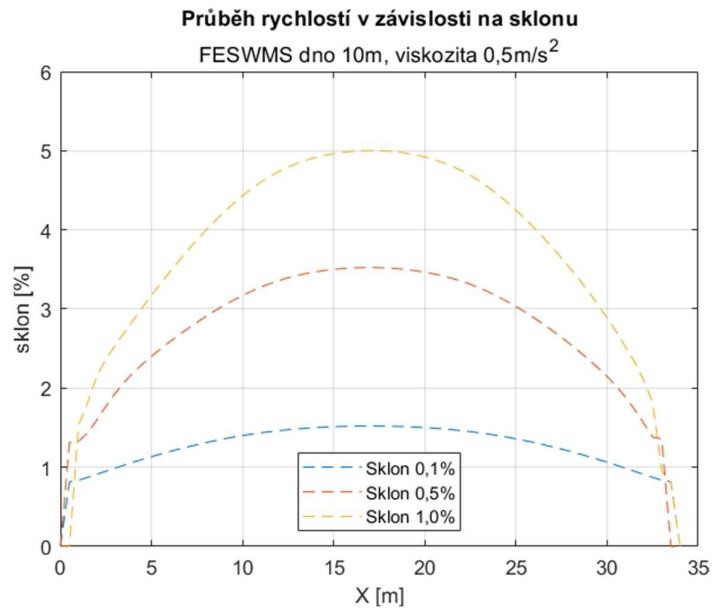
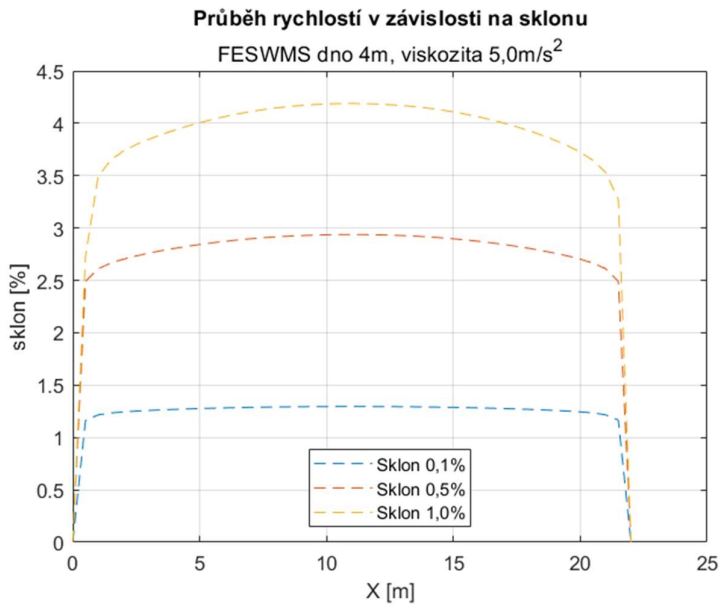
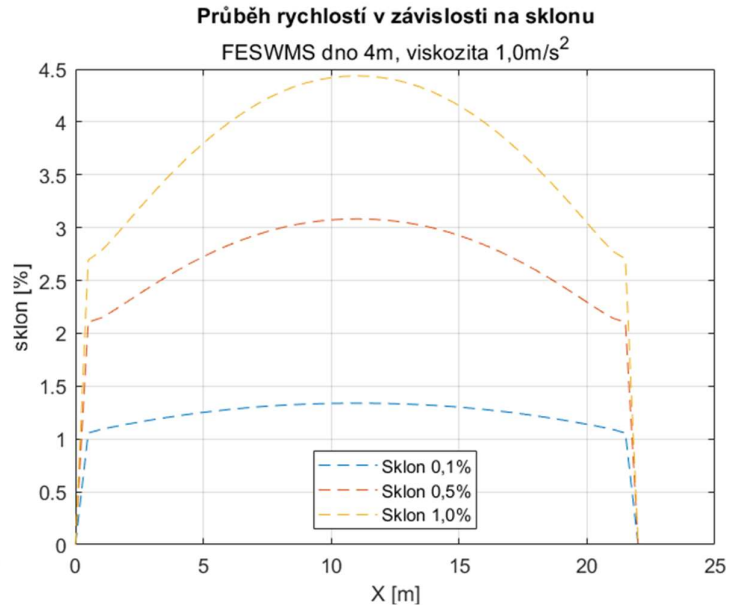
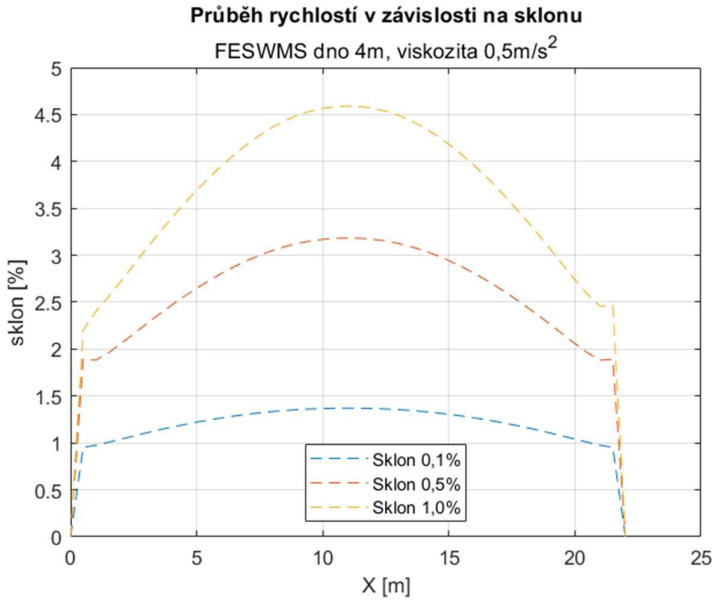


# Příloha D - Průběh rychlostí v závislosti na parametru viskozity – HEC-RAS

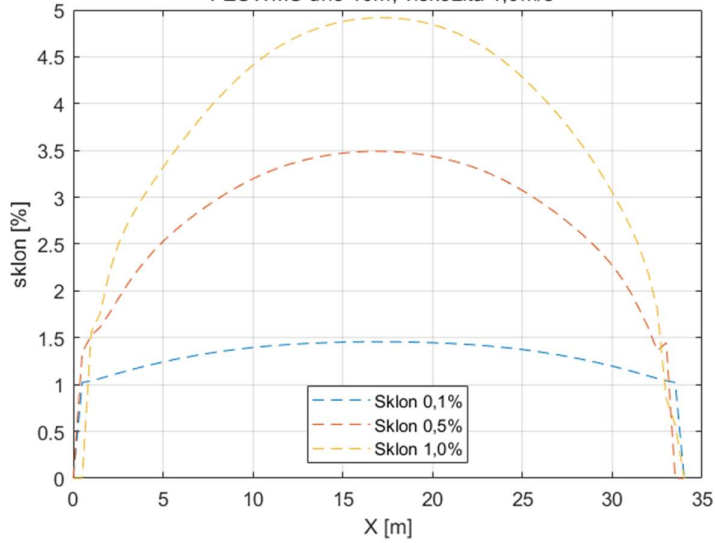




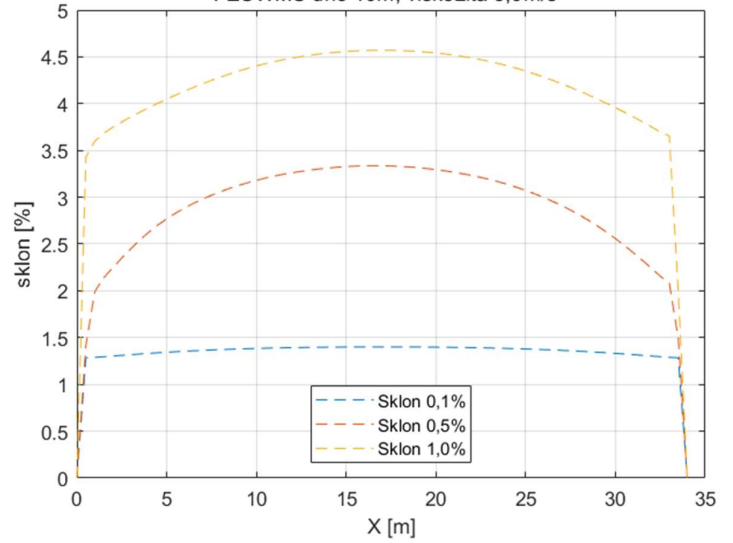
# Příloha E - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – FESWMS



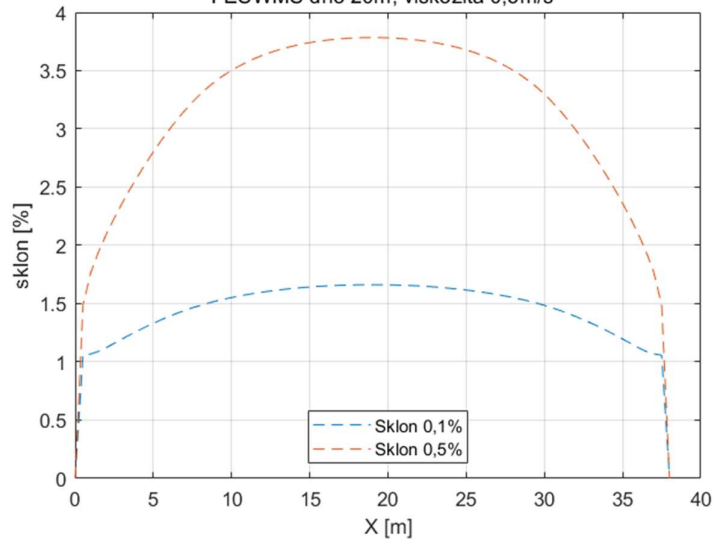
**Průběh rychlostí v závislosti na sklonu**  
FESWMS dno 10m, viskozita 1,0m/s<sup>2</sup>



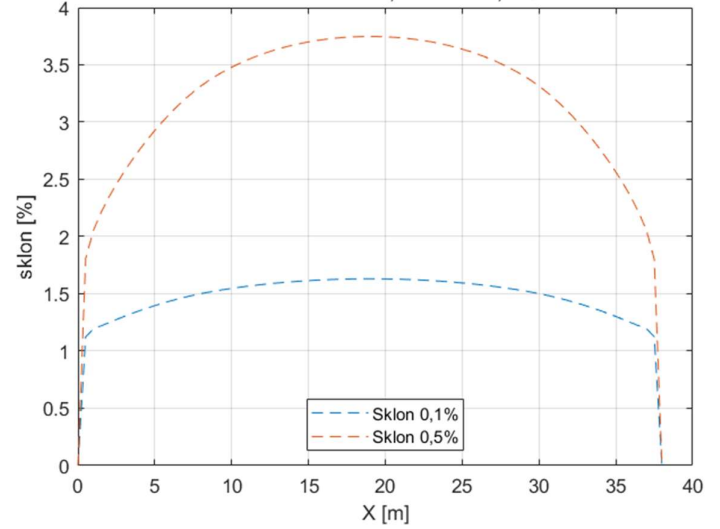
**Průběh rychlostí v závislosti na sklonu**  
FESWMS dno 10m, viskozita 5,0m/s<sup>2</sup>



**Průběh rychlostí v závislosti na sklonu**  
FESWMS dno 20m, viskozita 0,5m/s<sup>2</sup>



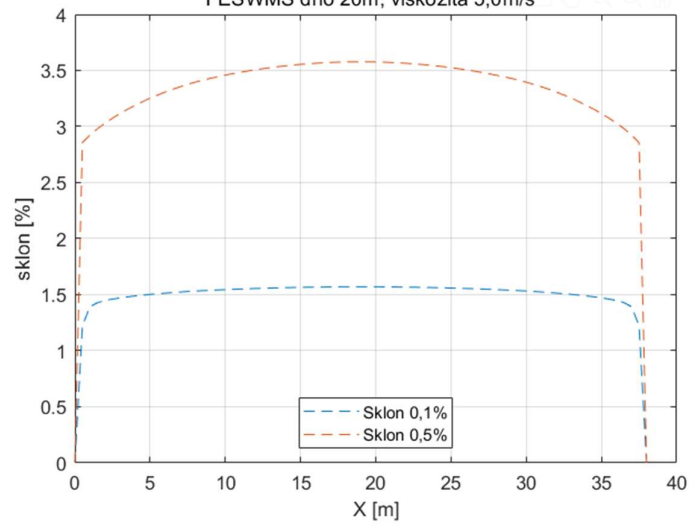
**Průběh rychlostí v závislosti na sklonu**  
FESWMS dno 20m, viskozita 1,0m/s<sup>2</sup>



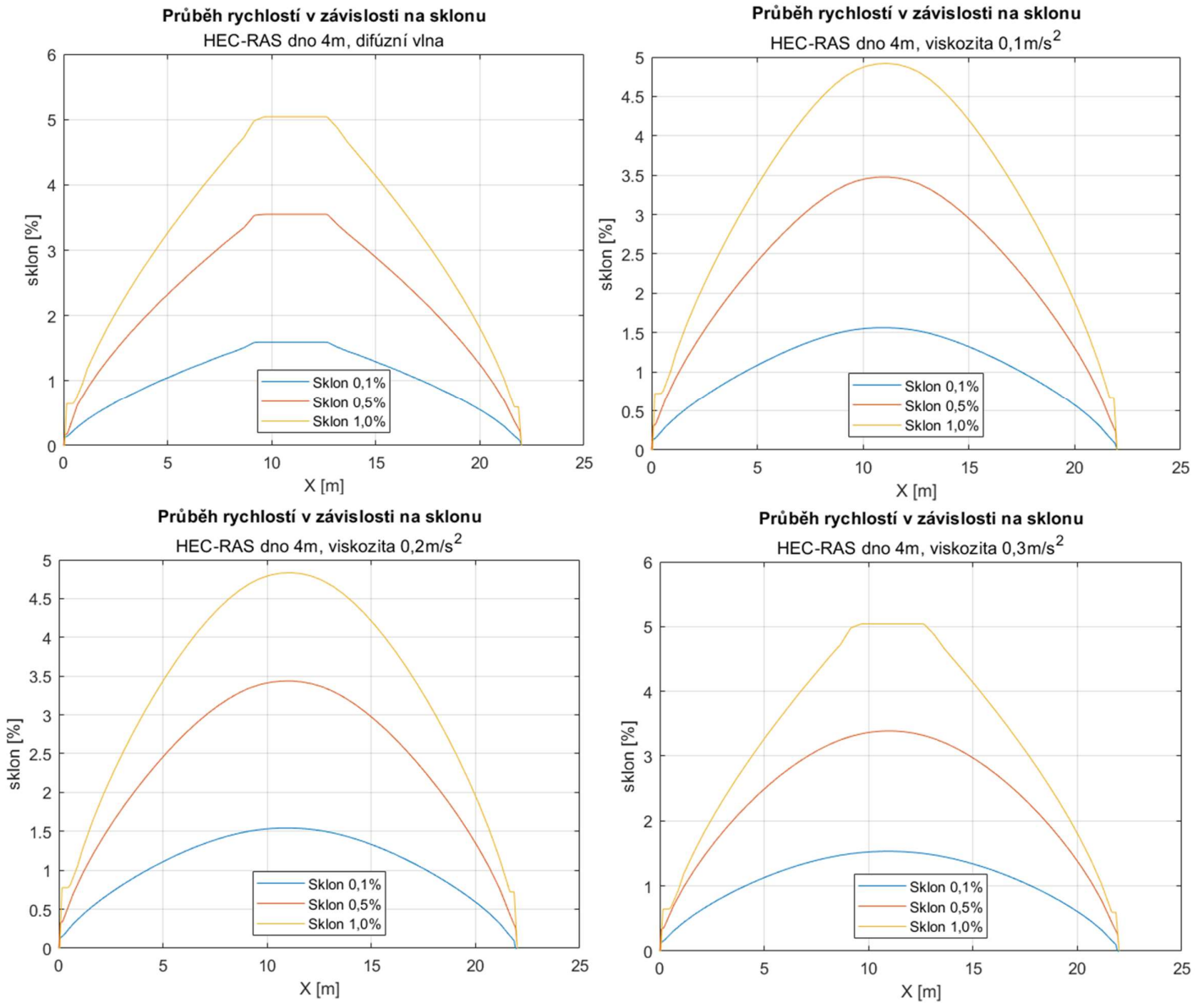


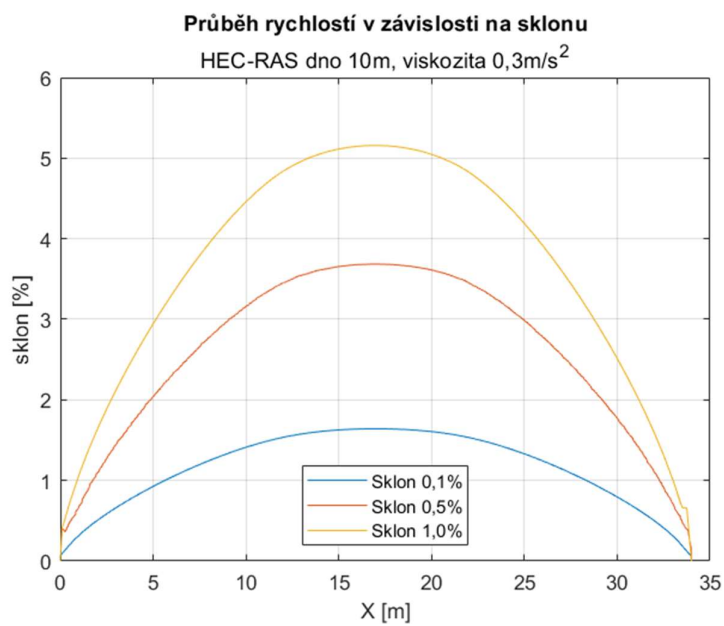
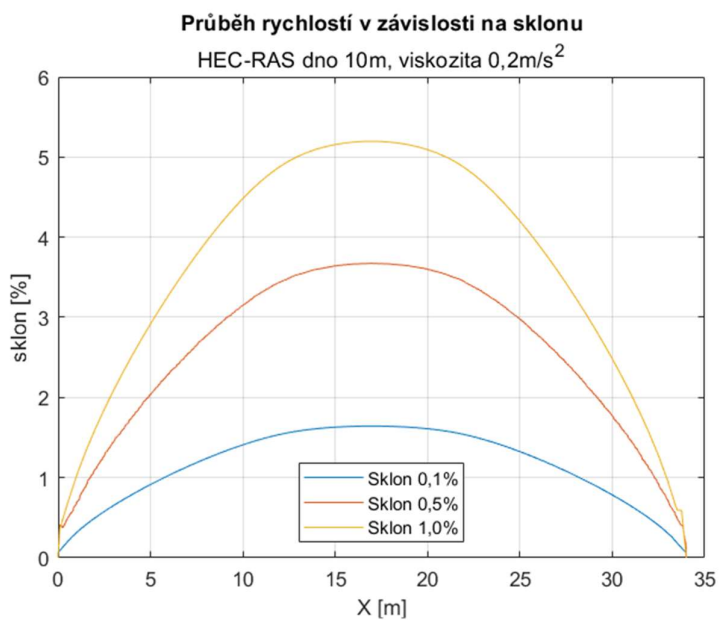
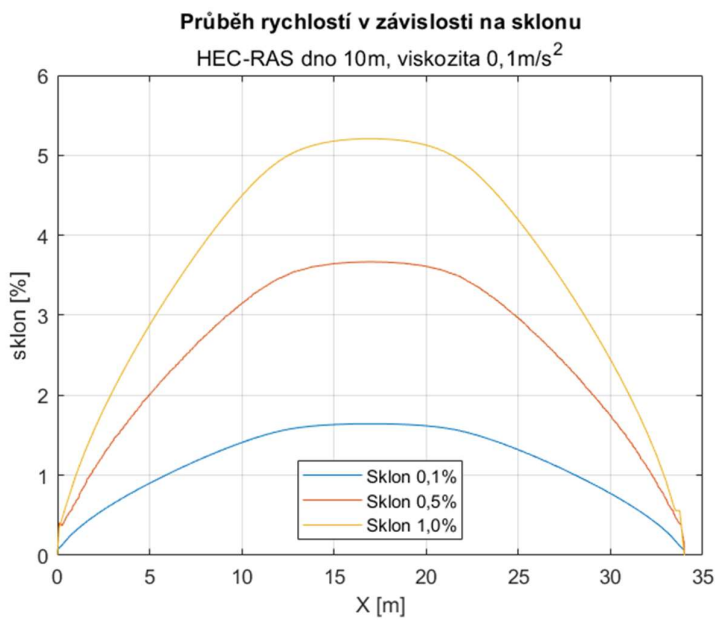
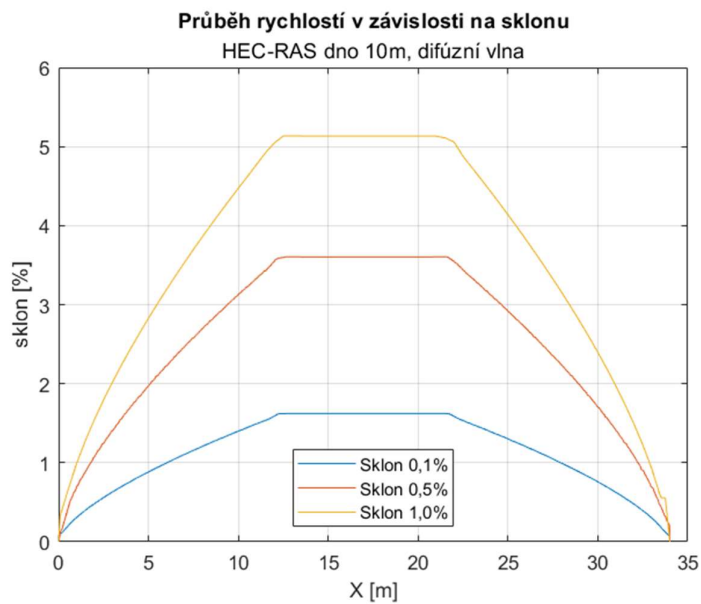
### Průběh rychlosti v závislosti na sklonu

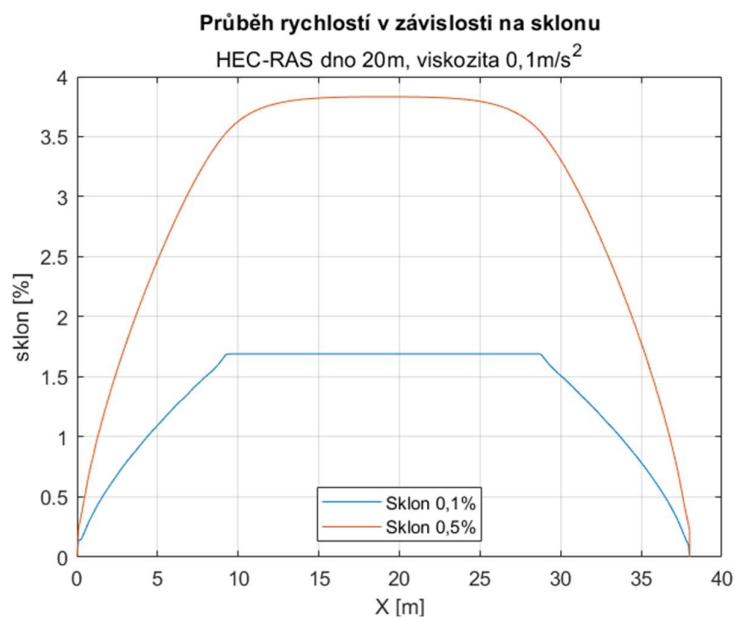
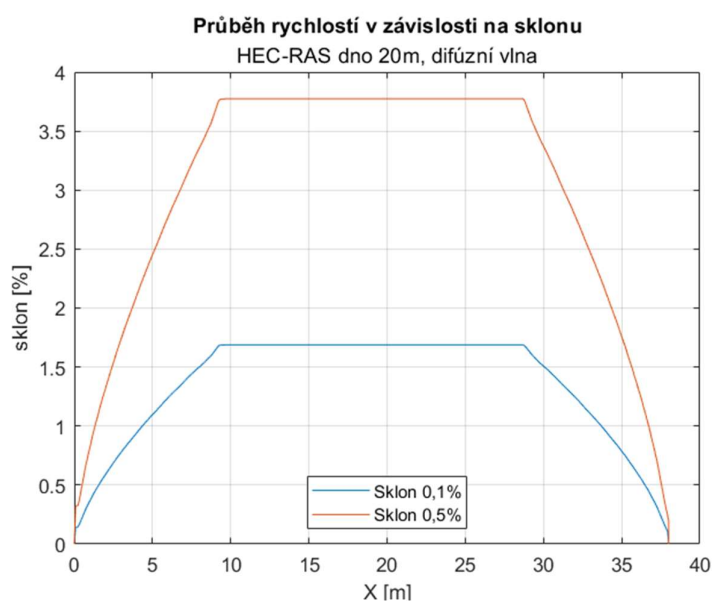
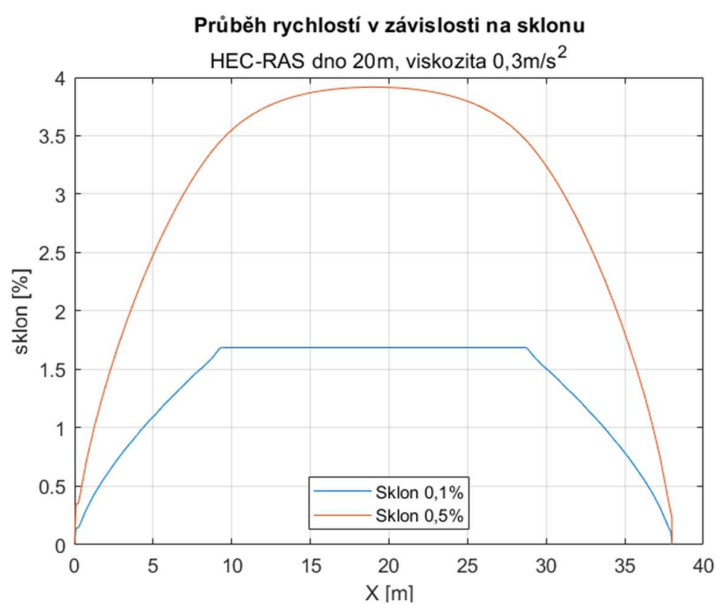
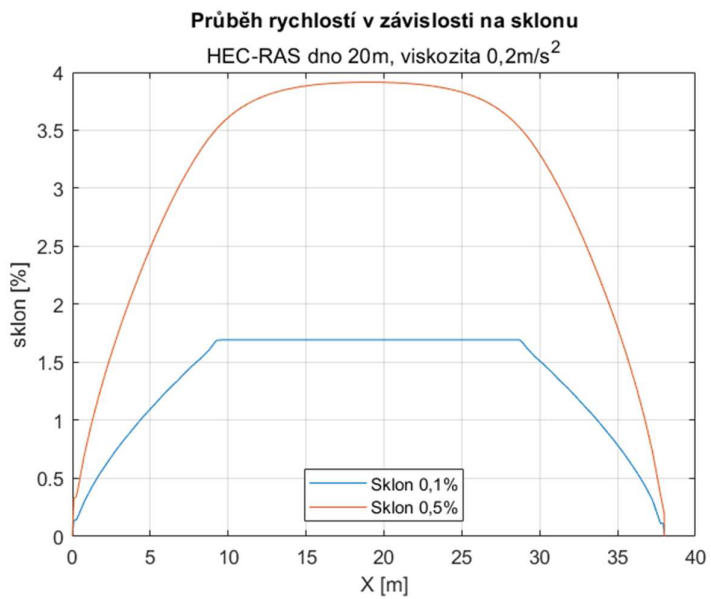
FESWMS dno 20m, viskozita 5,0m/s<sup>2</sup>



## Příloha F - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – HEC-RAS

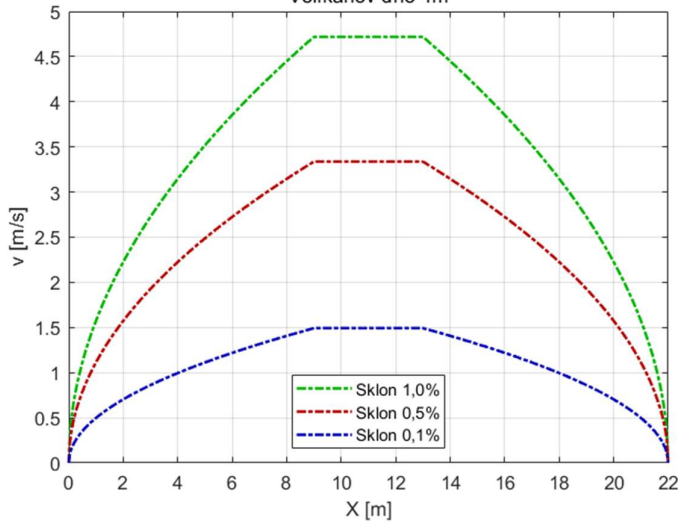




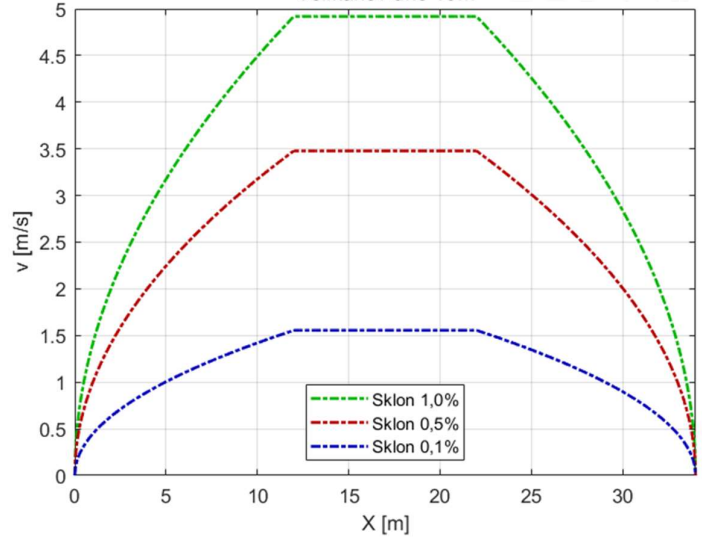


# Příloha G - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – Velikanov

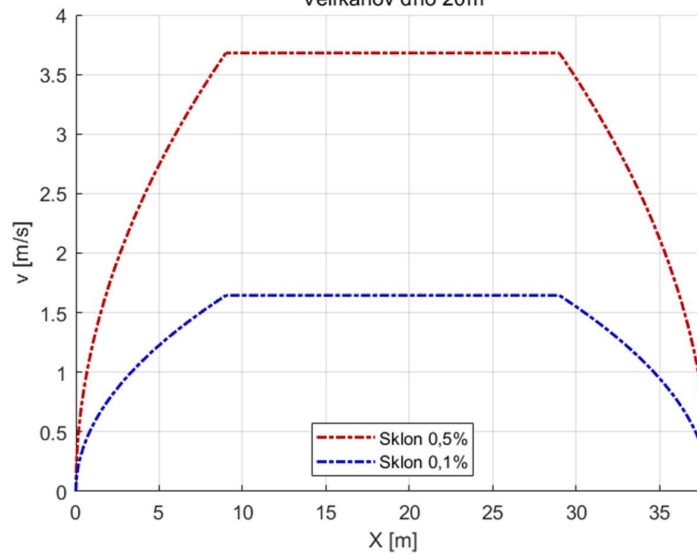
Graf průběhu průřezových rychlostí v závislosti na sklonu  
Velikanov dno 4m



Graf průběhu průřezových rychlostí v závislosti na sklonu  
Velikanov dno 10m



Graf průběhu průřezových rychlostí v závislosti na sklonu  
Velikanov dno 20m



# Příloha H - Průběh rychlostí v závislosti na sklonu čáry energie – sloučené grafy

