



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ
V BEZPEČNOSTNÍM PŘELIVU**

NUMERICAL MODELLING OF FLOW IN SPILLWAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN JANDORA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jiří Svoboda
Název	Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Kolář, V., Patočka, C., Bém, J. 1983. Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha.

Čihák, F., Valenta, P., Vaněček, S., Zeman, E. 1991. Automatizace inženýrských úloh. ČVUT, Praha.

Rodi W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics. International Association for hydraulic research, state-of-the-art paper, Delft.

Jandora, J. 2008. Matematické modelování ve vodním hospodářství. VUT v Brně.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce bude obsahovat:

- Úvodní část.
- Účel a popis práce.
- Matematický popis problému.
- Numerické modelování proudění vody.
- Výsledky modelování.
- Závěrečné zhodnocení.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je řešení numerického modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Boskovice. V úvodu diplomové práce jsou obecně popsány a rozděleny základní přelivy podle jejich tvaru a typu. Jsou zde také uvedeny bezpečnostní přelivy používané na vodních dílech. Poté následuje popis výpočtu přepadového množství, popis matematického modelování a používaných turbulentních modelů. Dále se práce zabývá technickým popisem vodního díla Boskovice, tvorbou virtuálního 3D modelu bezpečnostního přelivu, spadiště a skluzu v softwaru AutoCAD 2020 a jeho kontrolou a opravou v softwaru Blender. V závěru jsou uvedeny výsledky numerického modelování proudění ze softwaru Flow-3D a jejich následné porovnání s hydraulickým modelovým výzkumem uskutečněným na Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezpečnostní přeliv, numerický model, 3D model, FLOW-3D, VD Boskovice, sypaná kamenitá hráz.

ABSTRACT

The goal of the diploma thesis is the numerical modelling of flow in planned spillway of the Boskovice dam. In the introduction of this diploma thesis are described and divided basic spillways according to their types and profiles. There are also mentioned emergency spillways. Then the thesis introduces the description of calculation of overflow quantity, the description of mathematic modelling and used turbulent models. The next part is concerned with the technical description of the Boskovice dam, the creation of virtual 3D model of spillway and spillway chute in the AutoCAD 2020 software and concerned with the control and revision of model in the Blender software. In the end of the thesis are mentioned results of numeric modelling of flow gained from the Flow-3D software and the comparison of results with the research of hydraulic model implemented at Water structures institute of Faculty of Civil Engineering of BUT.

KEYWORDS

Spillway, numerical model, 3D model, FLOW-3D, Boskovice dam, rockfill dam.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jiří Svoboda *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu*. Brno, 2021. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Jiří Svoboda
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Jiří Svoboda
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Janu Jandorovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Dále děkuji Ing. Petru Holomkovi z Povodí Moravy, s. p. za poskytnutí potřebných podkladů a Ing. Davidovi Duchanovi, Ph.D. za instalaci softwaru Flow-3D a za čas, který mi věnoval. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině, která mě během celého studia a při tvorbě této práce podporovala.

OBSAH

A . Úvodní část	1
A.1 Účel a popis práce	1
B . Základy hydrauliky	3
B.1 Přelivy a jejich základní rozdělení	3
B.1.1 Ostrohanné přelivy	3
B.1.2 Jezové nebo přehradní přelivy	4
B.1.3 Přelivy se širokou korunou	4
B.1.4 Zvláštní typy přelivů	5
B.2 Bezpečnostní přeliv	5
B.2.1 Rozdělení bezpečnostních přelivů	6
B.3 Výpočet přepadového množství	7
B.3.1 Součinitel zatopení.....	9
B.3.2 Součinitel šikmosti (vliv půdorysného uspořádání).....	9
B.3.3 Boční kontrakce	10
B.3.4 Součinitel přepadu	11
B.4 Nerovnoměrné proudění v bezpečnostním přelivu	14
C . Matematický popis problému	15
C.1 Základní rovnice hydrodynamiky	15
C.1.1 Zákon zachování hmotnosti.....	15
C.1.2 Věta o změně hybnosti.....	17
C.2 Navier-Stokesovy rovnice	19
C.3 Turbulentní proudění	21
C.3.1 Reynoldsovy rovnice.....	21
C.4 Matematický model proudění	23
C.5 Turbulentní modely	23
C.5.1 $k-\varepsilon$ model	24
C.5.2 RNG $k-\varepsilon$ model.....	25
C.6 Numerické metody	26
C.6.1 Metoda konečných diferencí.....	26

C.6.2	Metoda konečných prvků	27
C.6.3	Metoda konečných objemů	27
D.	Vodní dílo Boskovice	28
D.1	Technický popis díla.....	29
D.1.1	Těleso hráze	29
D.1.2	Výpustné a odběrné zařízení	31
D.1.3	Bezpečnostní přeliv.....	32
D.1.4	Skluz a vývar	33
D.2	Hydrologické podklady	35
E.	Numerické modelování proudění vody	37
E.1	Tvorba virtuálního 3D modelu.....	37
E.2	Kontrola a úprava virtuálního 3D modelu.....	44
E.3	Modelování proudění.....	45
E.3.1	Nastavení numerického modelu.....	46
E.3.2	Vytvoření výpočetní sítě	47
F.	Výsledky numerického modelování	53
F.1.1	Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu a fyzikálního modelu	54
F.1.2	Převedení kulminačního průtoku $KPV_{10\ 000}$	62
F.1.3	Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ a laminárního modelu.....	62
G.	Závěrečné zhodnocení.....	64
H.	Použité podklady.....	66
I.	Seznam tabulek.....	68
J.	Seznam obrázků	69
K.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	71

A. Úvodní část

Vodní díla (VD) nemají pouze pozitivní dopady, jako je zásobování obyvatelstva pitnou vodou, ochrana před povodněmi, výroba elektrické energie a mnoho dalšího. Vodní díla, zejména ta s větším objemem zadržované vody, mohou bohužel být i výrazným zdrojem ohrožení. Během jejich provozu může dojít hypoteticky k jejich havárii, a to vlivem přírodních sil nebo i selháním lidského faktoru. V případě VD Boskovice, u kterého byl bezpečnostní přeliv vybrán k numerickému modelování proudění, je toto dílo zařazeno do I. kategorie. Jeho teoretická havárie by mohla způsobit mimořádně vysoké ekonomické škody, škody na životním prostředí a také vyvolat sociální dopady v rozsahu státu a způsobit velké ztráty na lidských životech. K hypotetické havárii může dojít z mnoha různých důvodů, například u sypaných hrází při extrémních povodňových průtocích, kdy přelitím koruny sypané hráze může dojít k povrchové erozi vzdušního svahu hráze a následně až k protržení sypané hráze. Aby k takovéto události nedošlo jsou na VD budovány bezpečnostní přelivy, které by měly svojí dostatečnou kapacitou odpovídající příslušné kategorii VD, přelití hráze zamezit. Bohužel jsou ale v historii provozování VD případy, kdy bezpečnostní přeliv neměl dostatečnou kapacitu a při extrémních povodňových průtocích došlo k přelití hráze a následnému protržení hráze VD. Z tohoto důvodu je návrh bezpečnostního přelivu velice finančně a časově náročný proces. Při návrhu je zkoumána jejich dostatečná kapacita sloužící k bezpečnému převedení návrhové povodňové vlny (NPV) a kontrolní povodňové vlny (KPV). K ověření vhodného návrhu je používáno modelování proudění v bezpečnostním přelivu, kdy je běžně využíván fyzikální model, který je vytvořen ve zmenšeném měřítku v laboratoři. Již několik let je díky zvyšujícím se možnostem využití výpočetní techniky možné na modelování proudění v bezpečnostním přelivu využít numerické modelování v různých dostupných softwarech, a to pomocí simulace proudění tekutin (CFD) a tím výrazně snížit finanční náklady.

A.1 Účel a popis práce

Účelem této práce je porovnání výsledků numerického modelování proudění vody v modelu bezpečnostního přelivu VD Boskovice s výsledky fyzikálního modelu – Hydraulického modelového výzkumu, který byl uskutečněn v roce 2013 na Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT [7]. Toto porovnání má za účel, pokud možno prokázat spolehlivost numerického modelování, které během několika následujících let může v případě získávání dostatečně spolehlivých výsledků vést k postupnému snížení počtu finančně

nákladnějších fyzikálních hydraulických modelových výzkumů prováděných v laboratoři. A toto fyzikální modelování případně použít k ověření návrhu z numerického modelování.

V úvodu diplomové práce je uvedeno základní rozdělení přelivů podle jejich tvaru a typu a také rozdělení bezpečnostních přelivů používaných na vodních dílech, rovnice používané na výpočet přepadového množství a popis matematického modelování. Dále je uveden technický popis VD Boskovice a postup tvorby modelu zkoumaného bezpečnostního přelivu, spadiště a skluzu v softwaru AutoCAD a jeho kontroly a opravy v softwaru Blender. Ve vytvořeném virtuálním modelu je šířka přelivné hrany 21,99 m, tedy stejná jako v Hydraulickém modelovém výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7], aby bylo možné modely vzájemně porovnat. Avšak šířka již zrekonstruovaného bezpečnostního přelivu VD Boskovice je 24,60 m. V této práci byly v softwaru Flow-3D vypočítány tři hlavní numerické modely, a to dva modely s hladinou v nádrži na kótě mezní bezpečné hladiny MBH (432,30 m n. m.), přičemž jeden model byl turbulentní a jeden laminární. Třetím numerickým modelem byl model turbulentní, který měl zvolenu počáteční podmínku takové úrovně hladiny, při které by teoreticky došlo k převedení kontrolní povodňové vlny $KPV_{10\,000}$ s kulminačním průtokem $Q_{10\,000} = 186,5 \text{ m}^3/\text{s}$, jelikož při MBH nebyl tento průtok převeden. V závěru jsou uvedeny výsledky těchto numerických modelů proudění a jejich následné porovnání s fyzikálním hydraulickým modelovým výzkumem uskutečněným na Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT.

B. Základy hydrauliky

B.1 Přelivy a jejich základní rozdělení

Nejprve je nutné definovat co je to přeliv a podle jakých kritérií a na jaké základní typy přelivů se dělí. Přeliv je konstrukce, která může být umístěna například kolmo k nabíhajícímu proudu vody. Takto umístěná konstrukce způsobí vzdouvání vody a následné přepadání přes ní. Tento jev je nazýván přepad a je definován jako výtok kapaliny otvorem bez jakéhokoliv omezení shora. Přelivy se mohou dělit podle mnoha různých hledisek. Dále je uvedeno pouze základní rozdělení.

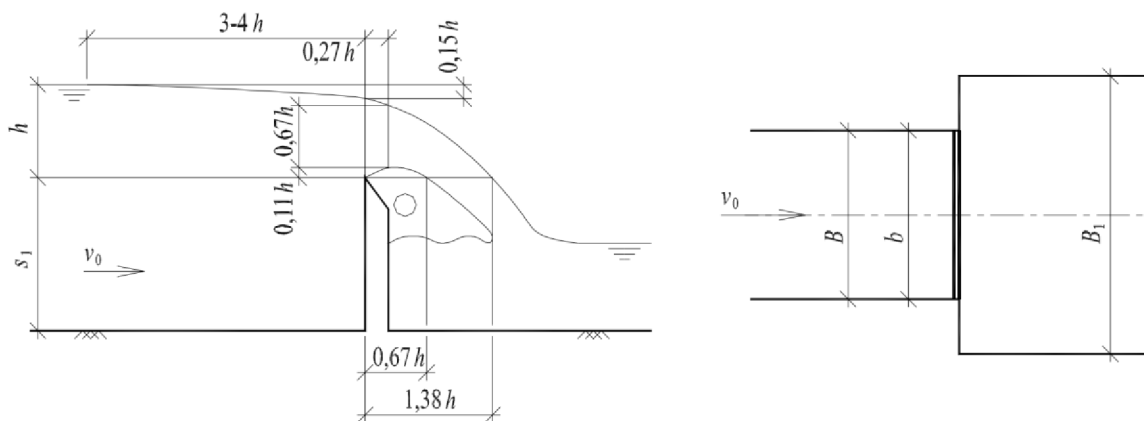
Rozdělení dle tvaru a tloušťky přelivné stěny [1]:

- ostrohranné přelivy,
- jezové nebo přehradní přelivy,
- přelivy se širokou korunou,
- zvláštní typy přelivů.

B.1.1 Ostrohranné přelivy

Ostrohranným přelivem je nazýván pouze takový přeliv, kde je dodržena nerovnost $t < 0,66 h$. To znamená, že tloušťka přelivné stěny t je menší než 0,66násobek přepadové výšky přepadového paprsku h , která by měla být měřena ve vzdálenosti $(3-4) h$ od přelivu.

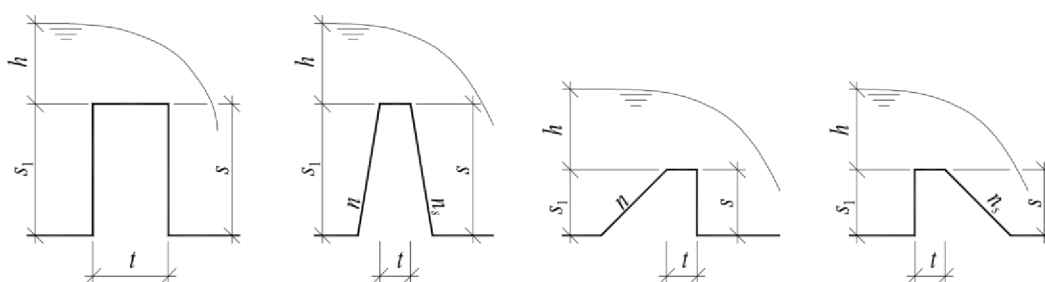
Při dodržení dokonalého přepadu, volného přepadového paprsku, uklidněného přítoku, hladké a svislé přelivné stěny, jejíž koruna má tvar jednostranného břitu, je tento typ přelivu využíván pro přesné měření průtoků. Základním měrným ostrohranným přelivem je Bazinův přeliv, který má obdélníkový průtočný profil bez bočního zúžení se zavzdušněným prostorem pod přepadovým paprskem. Základní typ ostrohranného přelivu je zobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Základní typ ostrohranného přelivu (Bazinův přeliv) [1]

B.1.2 Jezové nebo přehradní přelivy

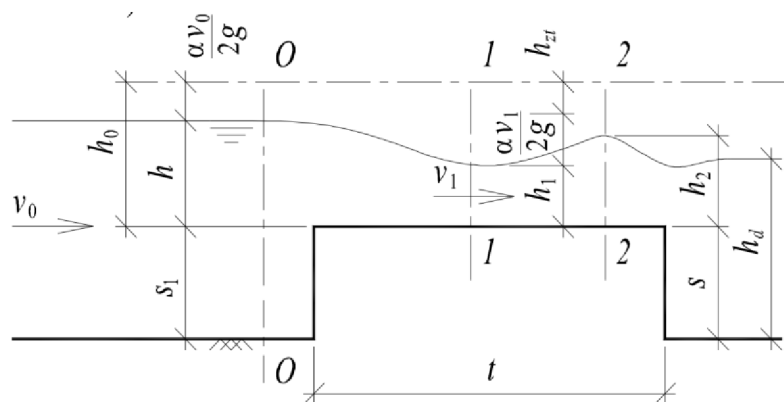
Jezové nebo přehradní přelivy mohou být tvořeny pevnou nebo pohyblivou konstrukcí sloužící ke vzdouvání vody v toku nebo nádrži. Příčné profily pevných konstrukcí mohou mít podobu mnoha různých tvarů, a to obdélníku, lichoběžníku nebo proudnicové přelivné plochy. Na pohyblivé konstrukce se využívají např. segmentové, klapkové nebo tabulové uzávěry. U těchto typů přelivů by se tloušťka přelivné stěny t měla pohybovat dle [1] v intervalu od $0,67 h$ do $(2-3) h$, kde h je výška přepadového paprsku. Na obrázku 2 jsou zobrazeny příklady možných tvarů příčných profilů jezových nebo přehradních přelivů.



Obrázek 2: Příklady tvarů příčných profilů jezových nebo přehradních přelivů [1]

B.1.3 Přelivy se širokou korunou

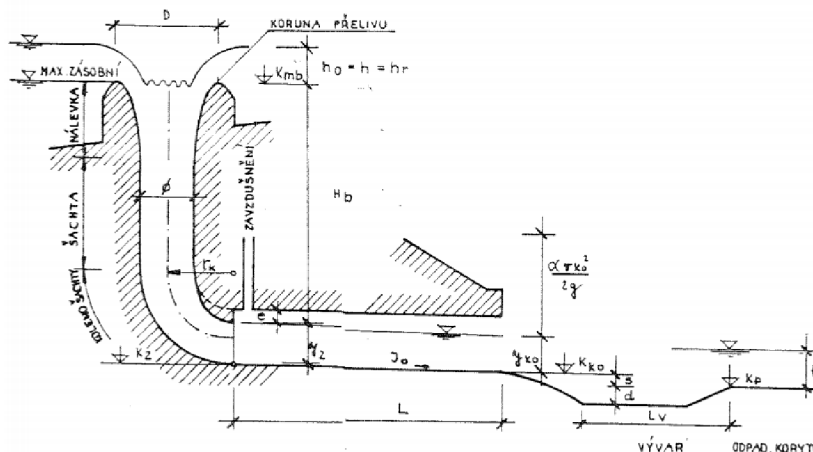
Přelivem se širokou korunou je nazýván takový přeliv, kdy voda přepadá přes široký práh, který vystupuje nad dno toku, má vodorovnou korunu a současně je splněna nerovnost $t \geq (2-3) h$. To znamená, že tloušťka koruny přelivu t má být dvakrát až třikrát větší než přepadová výška přepadového paprsku h [1]. Na obrázku 3 je zobrazen příklad přelivu se širokou korunou s dokonalým přepadem.



Obrázek 3: Přeliv se širokou korunou [1]

B.1.4 Zvláštní typy přelivů

Mezi zvláštní typy přelivů se řadí například šachtový přeliv nebo boční přeliv. Šachtový přeliv je proudnicový rotačně symetrický přeliv a je složen z jednotlivých částí, a to nálevky (proudnicový přeliv), svislé šachty, zužujícího se kolena a odpadní štolý. Šachtový přeliv je dále popsán v další kapitole. Jeho schématický podélný řez je zobrazen na obrázku 4.



Obrázek 4: Schématický podélný řez šachtovým přelivem [14]

B.2 Bezpečnostní přeliv

Bezpečnostní přeliv je jeden z prvků vodního díla, který může být součástí vodního díla nebo může tvořit samostatný objekt. Bezpečnostní přeliv, který bývá buď hrazený nebo nehrazený, slouží k bezpečnému převedení povodňové vlny přes VD a tedy k ochraně tělesa hráze proti přelití vody přes korunu hráze. Měl by tedy mít dostatečnou kapacitu na převedení NPV a KPV, a to v závislosti na zařazení vodního díla do příslušné kategorie, tak aby nedošlo k havárii VD a tím ke vzniku ekonomických škod, škod na životním prostředí nebo ke ztrátám lidských životů. Z těchto důvodů bývá jejich kapacita ověřována na fyzikálních modelech v laboratořích anebo také již několik posledních let i pomocí numerického modelování.

U sypaných přehrad, kterou je i VD Boskovice, mohou být využívány všechny typy přelivů, nicméně se nejčastěji využívají především přelivy korunové, boční a šachtové. V tabulce 1 je uvedeno zastoupení jednotlivých typů bezpečnostních přelivů použitých u tuzemských sypaných zemních a kamenitých přehrad s celkovým objemem akumulované vody větším než 1 mil. m³.

Tabulka 1: Bezpečnostní přelivy tuzemských přehrad [23]

	Počet		Korunový	Boční	Šachtový		Ostatní	Není
					Samostatný	Sdružený		
Sypané zemní	45	Celkový počet	11	21	5	5	3	1
		Z toho hrazených	8	2	0	0	0	0
Sypané kamenité	18	Celkový počet	3	8	2	4	1	1
		Z toho hrazených	3	0	0	1	0	0

Na VD Rozkoš není vybudován bezpečnostní přeliv, jelikož hladina v nádrži nemůže vlivem úrovně vtoku do přivaděče mezi VD a řekou Úpou a hladiny Úpy ve Zlíči vystoupit výše jak 1 m pod úroveň koruny hráze. V případě horní nádrže VD Dlouhé Stráně není bezpečnostní přeliv vybudován, jelikož VD nemá přirozený přítok, mimo srážek do nádrže. Do kategorie ostatní jsou zařazeny sypané přehrad s kašnovým bezpečnostním přelivem, které jsou součástí sdruženého funkčního objektu. Jedná se o VD Pilská u Žďáru nad Sázavou, VD Němčice a VD Trnávka atd. VD Hracholusky sestává jak z korunového přelivu o 2 polích hrazeného klapkami, tak ze šachtového přelivu tvořící sdružený objekt. Důvodem byly zejména nedostatečné zkušenosti s budováním objektů tohoto typu. Hrazený šachtový přeliv (segment) je součástí sdruženého funkčního objektu dolní nádrže VD Dlouhé stráně. Hrazený boční přeliv (stavidlo) se nachází na VD Hostivař a pryžovým vakem je hrazen boční bezpečnostní přeliv VD Baška [23].

B.2.1 Rozdělení bezpečnostních přelivů

Bezpečnostní přelivy se mohou rozdělovat podle mnoha různých hledisek. Dále je ale uvedeno pouze jejich základní rozdělení.

Rozdělení dle půdorysného uspořádání koruny [4] a [23]:

- přelivy přímé,
- přelivy zakřivené,
- přelivy složené z přímých a zakřivených úseků,
- speciální tvary (obloukové, labyrintové, kašnové).

Rozdělení dle dispozice [4], [22] a [23]:

- přelivy korunové – tyto přelivy převádějí vodu přes korunu tělesa hráze a jsou budovány přímo v koruně hráze,
- přelivy postranní – přelivy z důvodu zvýšení bezpečnosti VD jsou umístěné v bezprostřední blízkosti tělesa hráze, voda přepadá souběžně se směrem toku,
- přelivy boční – u těchto přelivů voda přepadá téměř kolmo na směr vodního toku, bývají budovány mimo těleso hráze,
- přelivy šachtové – tyto přelivy pomocí svislé nebo šikmé šachty vybetonované jako věžový objekt nebo v boku údolí odvádí vodu do odpadní štol, mohou být součástí sdruženého objektu nebo jsou provedeny jako samostatný objekt,
- přelivy kašnové – přelivy s kruhovým, eliptickým a složeným půdorysem, odtok vody zajištěn skluzem nebo zaklenutou štolou,
- přelivy žlabové – tyto přelivy bývají součástí sdruženého objektu.

B.3 Výpočet přepadového množství

Při výpočtu přepadového množství je potřeba si nejprve uvědomit, že přepad je výtok kapaliny otvorem bez omezení shora nebo jehož hladina nedosahuje jeho horního obrysu. Z tohoto důvodu je pro určení přepadového množství přes přeliv obecného tvaru využívána upravená základní rovnice pro výpočet celkového průtoku otvorem v boční stěně, a to pomocí integrace od nejnižšího bodu přelivné hrany po hladinu.

Celkový průtok přes přeliv obecného průřezu dle [1]:

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_0^{h_1} \left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{1/2} y \, dh, \text{ kde } y \text{ je funkcí } (H-h), \quad (1)$$

kde

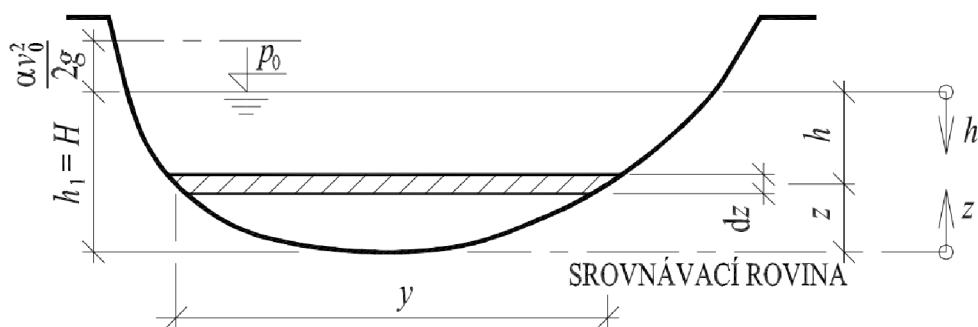
μ je součinitel přepadu daného přelivu [-],

g je gravitační zrychlení [m/s^2],

h je přepadová výška [m],

α je Coriolisovo číslo [-],

v_0 je přítoková rychlost [m/s].



Obrázek 5: Přepad přes přeliv obecného průřezu [1]

Při uvažování vodorovné přelivné hrany a obdélníkového profilu a tedy $y = b = \text{konst.}$, získáme pomocí integrace (1) Weisbachovu rovnici [1] pro přepadové množství Q :

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (2)$$

Bazin následně z Weisbachovi rovnice (2) odvodil vztah [1]:

$$Q = mb \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (3)$$

který bývá v upravené podobě využíván ke stanovení přepadového množství přes jezová nebo přehradní tělesa [1]:

$$Q = \sigma_z \sigma_s m b_0 \sqrt{2g} h_0^{3/2}, \quad (4)$$

kde

σ_z je součinitel zatopení [-],

σ_s je součinitel šikmosti [-],

m je součinitel přepadu [-],

b_0 je účinná šířka přelivu [m],

g je gravitační zrychlení [m/s^2],

h_0 je energetická přepadová výška [m],

$$h_0 = h + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (5)$$

kde

h je přepadová výška [m],

α je Coriolisovo číslo [-],

v_0 je přítoková rychlost [m/s].

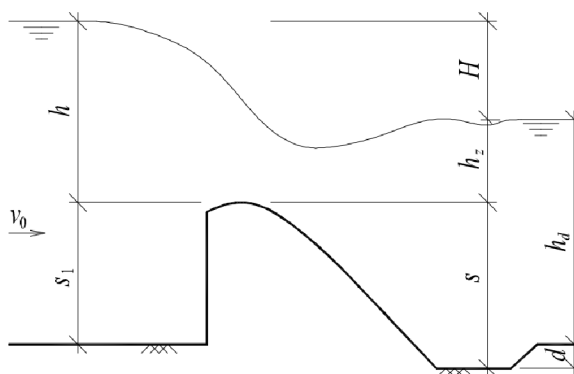
Výpočet přepadového množství je ovlivněn mnoha různými faktory, které mohou snižovat množství přepadající přes přeliv. Z tohoto důvodu byly ve vztahu pro výpočet přepadového množství upraveny vstupující veličiny a přidány součinitelé, které ovlivňují velikost přepadového množství. Jednotlivé upravené veličiny a součinitelé, které jsou popsány v dalších kapitolách.

B.3.1 Součinitel zatopení

Při výpočtu přepadového množství je nejprve nutné rozlišit, zda je dolní voda výše než koruna přelivu a následně určit, zda se jedná o přepad dokonalý nebo nedokonalý, jelikož v případě nedokonalého přepadu dochází ke snížení přepadového množství přes přeliv a tím tedy ke snížení jeho kapacity. Daný typ přepadu rozlišujeme pomocí součinitele zatopení σ_z , kdy při dokonalém přepadu je $\sigma_z = 1$ a při nedokonalém je $\sigma_z < 1$. Přechod z dokonalého na nedokonalý přepad nastává podle Bachmětěva při současném splnění dvou podmínek [1]:

$$1) h_d + d > s, \quad 2) \frac{H}{s} < \left(\frac{H}{s}\right)_* . \quad (6)$$

Poměr $\left(\frac{H}{s}\right)_*$ označuje mezní hodnoty, které závisí na poměru $\frac{h}{s}$ a součiniteli přepadu m . Hodnota součinitele zatopení σ_z je závislá jednak na poměru $\frac{h_z}{h}$ a jednak na tvaru přelivné plochy.

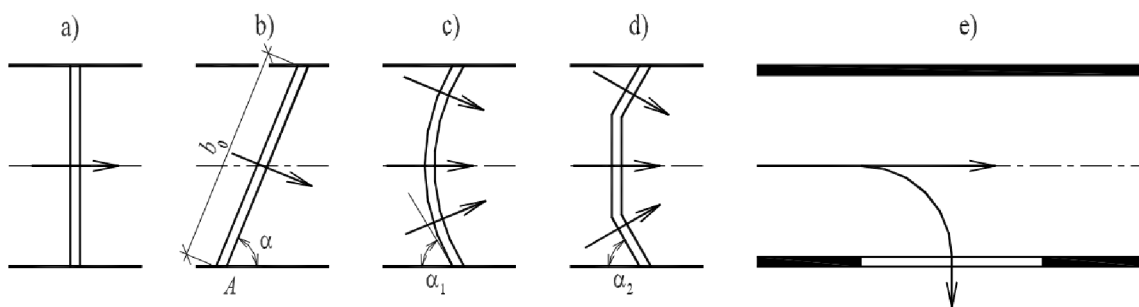


Obrázek 6: Nedokonalý přepad [1]

B.3.2 Součinitel šikmosti (vliv půdorysného uspořádání)

Dalším součinitelem, který ovlivňuje přepadové množství je součinitel šikmosti σ_s . Hodnota součinitele šikmosti σ_s je závislá na poměru $\frac{h}{s}$ a úhlu odklonu α přelivné hrany od břehové čáry a nabývá hodnot $\sigma_s \leq 1$. V případě lomených přelivů je nejprve nutné je rozložit na jednotlivé části a poté zjišťovat úhel odklonu α od břehové čáry. U obloukových přelivů se

zase za odchylku α_l považuje úhel tečny s břehovou čarou. Jednotlivé typy přelivů podle půdorysného uspořádání jsou zobrazeny na obrázku 7 v následujícím pořadí: čelní přeliv, šikmý přeliv, přeliv obloukový, přeliv lomený a přeliv boční.



Obrázek 7: Typy přelivů podle půdorysného uspořádání [1]

B.3.3 Boční kontrakce

Na stanovení přepadového množství přes jezová nebo přehradní tělesa má mimo jiné vliv i boční kontrakce, kdy vlivem neplynulého zúžení průtočného profilu dochází k odtržení proudu od stěny průtočného profilu a tím k vytváření vírů, které snižují celkovou šířku přelivné hrany. Při výpočtu přepadového množství u přelivu, kde k tomuto jevu dochází, je tedy nutné pomocí níže uvedeného vztahu zmenšit celkovou šířku přelivné hrany b na účinnou šířku přelivné hrany b_0 .

Ke stanovení účinné šířky přelivné hrany b_0 je využíván vztah dle [1]:

$$b_0 = b - 0,1 n \xi h_0, \quad (7)$$

kde

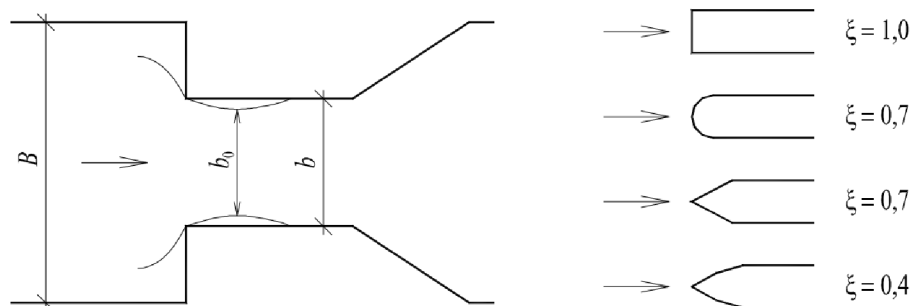
b je celková šířka přelivné hrany [m]

n je počet zúžení [-],

ξ je součinitel boční kontrakce [-],

h_0 je energetická přepadová výška [m].

Výsledná účinná šířka přelivné hrany b_0 závisí na počtu zúžení, přítokové rychlosti, ale také na tvaru pilířů. Základní tvary pilířů jsou zobrazeny na obrázku 8.

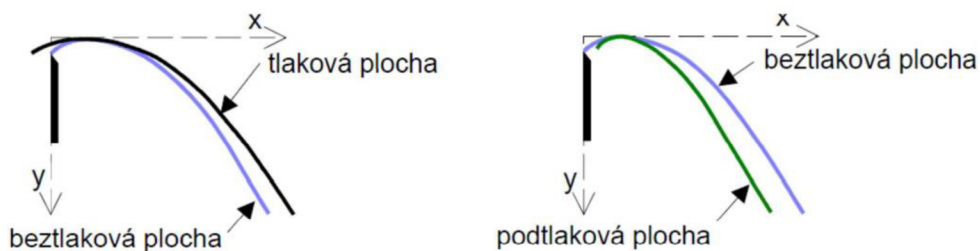


Obrázek 8: Boční kontrakce a součinitel bočního zúžení u piliřů [1]

B.3.4 Součinitel přepadu

Výpočet přepadového množství ovlivňuje také součinitel přepadu m . Na součinitel přepadu má zásadní vliv tvar přelivného tělesa, výška přelivné hrany nade dnem, přepadová výška a tlak působící na přeliv při přepadání vody. V případě obdélníkového příčného průřezu je součinitel přepadu závislý na poměru tloušťky přelivné stěny t k výšce přepadového paprsku h . Vzhledem k možnému vzniku podtlaku pod přepadajícím paprskem a poměrně nízkému součiniteli přepadu nejsou přelivy tohoto tvaru příliš vhodné. Podobně tomu je i v případě přelivů lichoběžníkového průřezu, které se již téměř nenavrhují.

Hydraulicky nejvýhodnějším tvarem přelivu pro jezová a přehradní tělesa je proudnicová přelivná plocha. Proudnicová přelivná plocha je vytvořena tak, že v podstatě kopíruje tvar spodního obrysu volného paprsku přepadajícího přes ostrou hranu. Rozměry proudnicové přelivné plochy jsou nejčastěji navrhovány na návrhovou přepadovou výšku h_n a to z toho důvodu, aby se snížila pravděpodobnost vzniku nepříznivých podtlaků a tím k možnému poškození přelivné plochy. Proudnicové plochy se rozdělují dle vznikajících tlaků působících na konstrukci přelivu při přepadání vody, a to na tlakové, podtlakové a beztlakové. Na obrázku 9 je znázorněno schematické porovnání beztlakové proudnicové plochy s tlakovou a podtlakovou proudnicovou plochou.



Obrázek 9: Schématické porovnání beztlakové proudnicové plochy s tlakovou a podtlakovou plochou [22]

Tlakové proudnicové přelivné plochy

Prvním typem proudnicové přelivné plochy je plocha tlaková. Ta je v podstatě navržena tak, aby až do předem určené návrhové přepadové výšky h_n přepadový paprsek mírně nadzdvihovala a tím ho podpírala. U takto navržených ploch dochází k tlaku na konstrukci a ke snížení součinitele přepadu m . Nejčastěji používanou tlakovou proudnicovou přelivnou plochou je plocha dle Smetany.

Podtlakové proudnicové přelivné plochy

Dalším typem proudnicové přelivné plochy je podtlaková plocha. Její tvar je navrhován tak, aby její zakřivení bylo větší, než zakřivení volného paprsku. Takto navržené plochy mají vlivem sání větší součinitel přepadu m , ale také dochází ke vzniku podtlaku a následně k poškozování konstrukce přelivu a mohou tedy nepříznivě ovlivňovat živostnost jeho přelivné plochy.

Beztlakové proudnicové přelivné plochy

Mezi beztlakové proudnicové plochy patří proudnicová plocha dle Scimemiho, jejíž přibližně stejný tvar je použit i u nově zrekonstruovaného bezpečnostního přelivu VD Boskovic. Beztlakové proudnicové plochy se jako u předchozí proudnicové plochy navrhují na návrhovou přepadovou výšku h_n při které by měl přepadající paprsek vody pouze doléhat na konstrukci přelivu bez jakýchkoliv přetlaků nebo podtlaků a součinitel přepadu by měl dle [1] dosahovat hodnoty $m_n=0,51$.

K určení součinitele přepadu slouží mnoho vztahů podle různých autorů. Jedním z používaných vztahů při kruhovém zaoblení koruny přelivu je vztah doc. Stary a RNDr. Koutkové, který byl využit při analýze volby velikosti buňky výpočetní sítě v další kapitole, a má tento tvar [3]:

$$m = 0,349494 + 0,307084 \frac{x}{\left(\frac{h}{s}\right)^{1,62877} + \left(\frac{s}{2 \cdot r}\right)^{-1,45694} + 0,223402}, \quad (8)$$

kde

h je přepadová výška [m],

s je výška přelivné hrany nad horním dnem [m],

r je poloměr přepadové hrany [m].

Dále byl využit vztah dle Rehbocka [2]:

$$m = \frac{2}{3} \left[0,312 + 0,09 \frac{h}{s_1} + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{h}{r} \right)^2} \right], \quad (9)$$

kde

h je výška přepadového paprsku [m],

s_1 je výška přelivné hrany nad horním dnem [m],

r je poloměr přepadové hrany [m].

Dalšími vztahy využitými při analýze volby velikosti buňky výpočetní sítě byly vztahy, které nevyjadřují přímo součinitel přepadu m , ale tzv. discharge coefficient C_D . Na určení discharge coefficient C_D byl využit vztah Rouve a Indlekofera [13]:

$$C_D = 0,94440 + 0,35497 \frac{HW}{R} - 0,10791 \left(\frac{HW}{R} \right)^2 + 0,010309 \left(\frac{HW}{R} \right)^3, \quad (10)$$

a vztah Jaegera [13]:

$$C_D = \frac{2}{3} \left(\frac{R}{HW} + \frac{4}{3} - \sqrt{\left(\frac{R}{HW} \right)^2 + \frac{4}{3} \frac{R}{HW}} \right), \quad (11)$$

kde

HW je energetická přepadová výška [m],

R je poloměr přepadové hrany [m].

Pro výpočet přepadového množství byl použit vztah pro výpočet specifického průtoku dle vztahu [13]:

$$q_w = C_D \sqrt{g} \left(\frac{2}{3} \cdot (H_1 - D) \right)^{3/2}, \quad (12)$$

kde

g je gravitační zrychlení [m/s^2],

H_1 je energetická výška nad horním dnem [m]; $HW = H_1 - D$,

D je výška přelivné hrany nad horním dnem [m].

B.4 Nerovnoměrné proudění v bezpečnostním přelivu

Při přepadu přes bezpečnostní přeliv je uvažováno, že dochází k nerovnoměrnému ustálenému proudění vody s volnou hladinou. Při tomto proudění jsou průtok a hydraulické charakteristiky (průřezová rychlost, průtočná plocha, drsnostní součinitel atd.) na čase nezávislé a neměnné, ale po délce proudění se již mění. Během pohybu vody dochází ke ztrátám energie, a to jednak ke ztrátám třením, které jsou způsobené třením vody o stěny průtočného profilu a vnitřního tření mezi jednotlivými proudovými vlákny, a jednak ke ztrátám místním vlivem změn průtočných průřezů. K tomuto proudění dochází i v případě proudění přes bezpečnostní přeliv VD Boskovice.

C . Matematický popis problému

C.1 Základní rovnice hydrodynamiky

Popis pohybu kapalin je složitý problém. Z tohoto důvodu jsou při výpočtu využívána zjednodušení, která bývají doplněna různými opravnými součiniteli. Jedním z uvažovaných zjednodušení je například to, že místo zkoumání pohybu jednotlivých molekul tekutiny je zkoumán pouze tzv. elementární objem kapaliny.

K odvození základních vztahů hydrodynamiky, která se zabývá pohybem kapalin a jejich působením na tuhá tělesa, se používá zákonů a vět klasické mechaniky [5]:

- zákon zachování hmotnosti,
- věta o změně hybnosti,
- zákon zachování energie,
- stavové rovnice.

C.1.1 Zákon zachování hmotnosti

Prvním zákonem používaným k odvození základních vztahů hydrodynamiky je zákon zachování hmotnosti. Z kterého plyne, že u proudící kapaliny se rozdíl mezi hmotností kapaliny vtékající do elementu a z elementu vytékající za časový interval dt a započítáním zdroje nebo propadu se musí rovnat časové akumulaci hmotnosti kapaliny v tomto elementu. Zákon zachování hmotnosti ve 3D je možné matematicky popsat ve směru x , y a z dle [5] těmito vztahy:

$$\rho v_x dy dz dt - \left(\rho v_x + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} dx \right) dy dz dt = - \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt, \quad (13a)$$

$$\rho v_y dx dz dt - \left(\rho v_y + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} dy \right) dx dz dt = - \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt, \quad (13b)$$

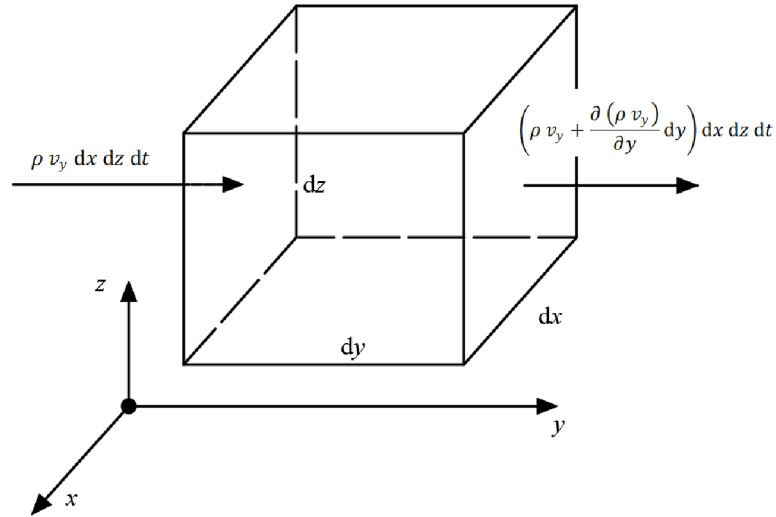
$$\rho v_z dx dy dt - \left(\rho v_z + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} dz \right) dx dy dt = - \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt, \quad (13c)$$

kde

$\rho(x, y, z, t)$ je hustota kapaliny [kg/m^3],

$v_i(x, y, z, t)$ je složka vektoru rychlosti ve směru x , y a z [m/s],

t je čas [s].



Obrázek 10: Spojitost proudu v elementárním hranolu ve směru osy y [5]

Po upravení předchozích rovnic (13) do jedné rovnice vyjadřující celkový rozdíl ve směru x , y a z dle [5] obdržíme:

$$-\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right) dx dy dz dt. \quad (14)$$

K vyjádření časové změny hmotnosti kapaliny obsažené v elementu je používán vztah [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt. \quad (15)$$

Při následném porovnání vztahu celkového rozdílu hmotnosti kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za časový interval dt se vztahem k vyjádření časové změny hmotnosti kapaliny obsažené v elementu lze získat tuto diferenciální rovnici [5]:

$$-\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right) dx dy dz dt = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt, \quad (16)$$

která po následných úpravách popisuje zákon zachování hmotnosti kapaliny nazývanou také jako rovnice spojitosti proudění pro stlačitelnou kapalinu (bez zdrojů a propadů) [5]:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (17)$$

V případě uvažování nestlačitelné kapaliny, a tedy i neměnné hustoty je možné tuto diferenciální rovnici (17) popisující zákon zachování hmotnosti kapaliny zapsat v tomto tvaru [5]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (18)$$

C.1.2 Věta o změně hybnosti

Další z všeobecně platných zákonů a vět klasické mechaniky je věta o změně hybnosti. Ta vychází z druhého Newtonova pohybového zákona hmotného bodu a je upravena na proud kapaliny. Věta o změně hybnosti je diskrétní vyjádření Newtona pohybového zákona, který říká, že součet všech sil, které na těleso působí je v rovnováze s hmotností a zrychlením na těleso působící. Při uvažování konstantní hmotnosti m je možné větu o změně hybnosti ve 3D díky Einsteinovy sumační teorii zapsat ve tvaru [5]:

$$F_i - m \frac{Dv_i}{Dt} = 0, \quad (19)$$

kde

$F_i(x, y, z)$ je složka vektoru síly [N],

m je hmotnost [kg],

$v_i(x, y, z)$ je složka vektoru rychlosti [m/s],

t je čas [s].

Celkové zrychlení v daném bodě pomocí substanciální derivace složky rychlosti v_i vyjadřuje dle [5] tento vztah:

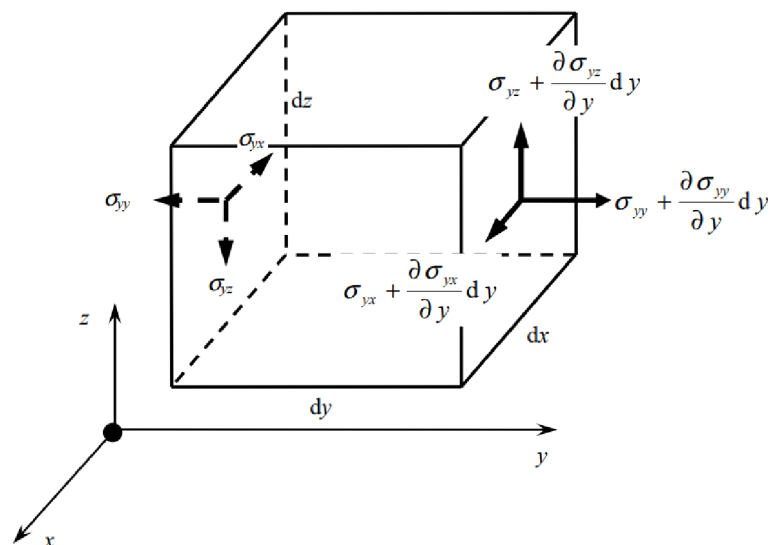
$$\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (20)$$

kde

$\frac{\partial v_i}{\partial t}$ je lokální složka zrychlení,

$v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ je konvektivní složka zrychlení.

Na infinitesimální (nekonečně malý) kontrolní element působí jednak síly povrchové (tlakové síly, smykové síly atd.) a jednak síly objemové (gravitační síly, Coriolisovy síly, elektromagnetické síly atd.). Na obrázku 11 jsou znázorněny jednotlivé složky povrchových sil.



Obrázek 11: Složky napětí působící na stěny rovnoběžné s rovinou xz [5]

Pohybová rovnice

Pohybová rovnice vyjadřuje působení sil na nekonečně malý kontrolní objem, v podstatě tedy větu o změně hybnosti. K vyjádření podmínek rovnováhy ve všech směrech souřadných os je používána tato rovnice [5]:

$$dF_i = dF_{bi} + dF_{si}, \quad (21)$$

kde

F_{bi} je složka vektoru síly objemového zatížení [N],

F_{si} je složka vektoru síly povrchového zatížení [N].

Po dosazení obou složek vektorů síly do druhého Newtonova pohybového zákona pro kapalinu a dále užitím vztahu vyjadřujícím celkové zrychlení v daném bodě, vztahu pro přírůstek hmotnosti dm a rovnice kontinuity má po následných úpravách výsledná pohybová rovnice pro pohybující se kapalinu ve 3D tento tvar [5]:

$$\rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j}. \quad (22)$$

kde

$\rho(x, y, z, t)$ je hustota kapaliny [kg/m^3],

$f_i(x, y, z, t)$ je složka vektoru obj. zatížení vztaženého na jednotku hmotnosti [m/s^2],

σ_{ij} je tenzor napětí [Pa],

$v_i(x, y, z)$ je složka vektoru rychlosti [m/s].

Prvky obsažené v pohybové rovnici představují:

ρf_i je objemová tíha,

$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$ jsou povrchové síly,

$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j}$ je substanciální derivace složky rychlosti v_i .

C.2 Navier-Stokesovy rovnice

Navier-Stokesovy rovnice slouží k popisu proudění nestlačitelné newtonovské kapaliny. Byly odvozeny z pohybové rovnice, ve které jsou za tenzor napětí σ_{ij} dosazeny konstitutivní vztahy. Ty vyjadřují závislost mezi tenzorem rychlosti přetvoření $\dot{\epsilon}_{ij}$ a tenzorem napětí σ_{ij} a mají v případě newtonovské stlačitelné kapaliny ve 3D tento tvar [5]:

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda(\rho, T) \dot{\epsilon}_v \delta_{ij} + 2\mu(\rho, T) \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (23)$$

kde

$p(x, y, z, t)$ je tlak [Pa],

δ_{ij} je Kroneckerovo delta [-],

$\lambda(\rho, T)$ je součinitel rychlosti objemového přetvoření [Pa.s],

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu, \quad (24)$$

$\dot{\epsilon}_v$ je rychlost objemového přetvoření [1/s],

$\mu(\rho, T)$ je součinitel dynamické viskozity [Pa.s],

$\dot{\epsilon}_{ij}$ je tenzor rychlosti přetvoření [1/s],

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (25)$$

Prvky obsažené v konstitutivních vztazích představují:

$-p \delta_{ij}$ lineární závislost tlaku,

$\lambda(\rho, T) \dot{\epsilon}_v \delta_{ij}$ změnu objemu,

$2\mu(\rho, T) \dot{\epsilon}_{ij}$ povrchové tření.

Po dosazení konstitutivních vztahů (23) do pohybové rovnice (22) získáme tento vztah [5]:

$$\rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\lambda \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial(\mu \dot{\epsilon}_{ij})}{\partial x_j} = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right), \quad (26)$$

který je následně upraven dosazením součinitele rychlosti objemového přetvoření $\lambda(\rho, T)$ a tenzoru rychlosti přetvoření $\dot{\epsilon}_{ij}$ a poté vydělen hustotou kapaliny ρ [5]:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3\rho} \frac{\partial(\mu \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (27)$$

kde

$f_i(x, y, z, t)$ je složka vektoru obj. zatížení vztaženého na jednotku hmotnosti [m/s^2],

ρ je hustota kapaliny [kg/m^3],

$v_i(x, y, z, t)$ složka vektoru rychlosti [m/s],

t je čas [s].

Členy obsažené v Navier-Stokesových rovnicích představují:

f_i zrychlení vyvolané objemovými silami,

$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ zrychlení vyvolané tlakovými silami,

$-\frac{2}{3\rho} \frac{\partial(\mu \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_i}$ zrychlení vyvolané objemovým přetvořením kapaliny,

$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]$ zrychlení vyvolané tvarovým přetvořením kapaliny,

$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ zrychlení vyvolané setrvačnými silami.

Aby při výpočtu Navier-Stokesových rovnic bylo dosaženo menšího počtu neznámých a tím došlo ke zjednodušení výpočtu je předpokládáno, že proudící kapalina je nestlačitelná a její hustota a viskozita jsou konstantní. Po těchto předpokladech mají Navier-Stokesovy rovnice pro nestlačitelnou kapalinu tento tvar [5]:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (28)$$

Při zavedení tenzoru viskózního napětí τ_{ij}^f [5]:

$$\tau_{ij}^f = 2 \mu \dot{\epsilon}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (29)$$

Ize z důvodu následného odvozování Reynoldsových rovnic zapsat Navier-Stokesovy rovnice (28) pro nestlačitelnou kapalinu v upraveném tvaru [5]:

$$\rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^f}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (v_j v_i)}{\partial x_j}. \quad (30)$$

C.3 Turbulentní proudění

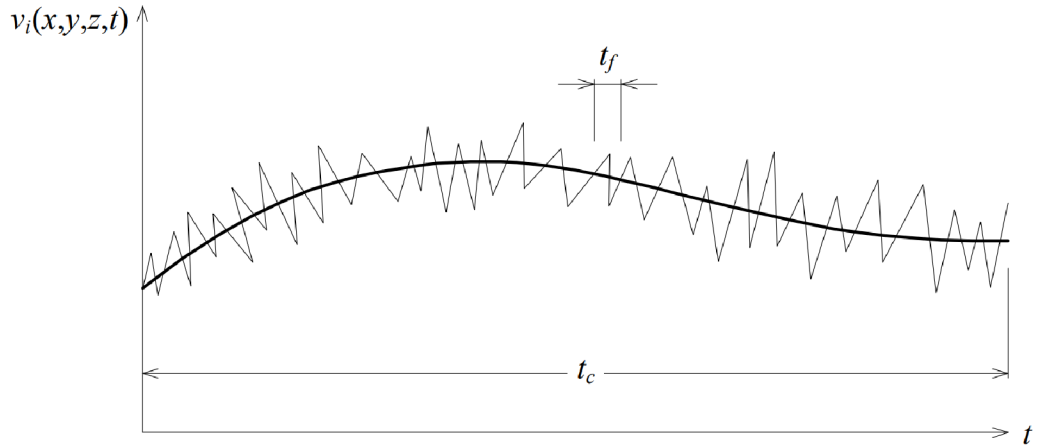
V hydrodynamice se rozlišují dva režimy pohybu tekutin. Prvním režimem pohybu je režim laminární, při kterém dráhy jednotlivých částic jsou navzájem souběžné a nedochází tedy k jejich vzájemnému mísení. Druhým režimem pohybu tekutin je režim turbulentní. Tento režim vzniká při větších rychlostech proudění a dochází při něm ke vzájemnému mísení částic a nepravidelnému kolísání rychlosti a tlaku. Matematický popis turbulentní proudění je tedy oproti laminárnímu proudění mnohem složitější. K turbulentnímu režimu proudění dochází i v případě proudění přes bezpečnostních přeliv.

Mezi základní vlastnosti turbulentního proudění patří [5]:

- **náhodný charakter proudění** – využití statistických metod ve výzkumu turbulence,
- **difuzivita** – schopnost přenášet hybnost, energii a různé skalární veličiny,
- **disipace energie** – přeměna turbulentní kinetické energie na tepelnou v důsledku práce viskózních napětí,
- **vířivost** s vysokým stupněm fluktuace,
- **třírozměrný charakter** – fluktuace způsobené deformací vírů.

C.3.1 Reynoldsovy rovnice

Reynoldsovy rovnice (nazývané také jako metoda RANS) jsou využívány při popisu turbulentního proudění. Při proudění tekutin jsou uvažované čtyři neznámé, a to tři neznámé vektoru rychlost v_i ve směru x , y a z a čtvrtá neznámá tlak p . V případě laminárního proudění jsou čtyři Navier-Stokesovy rovnice pro popis neznámých dostatečné, ale v případě turbulentního proudění, při kterém dochází k nepravidelnému kolísání rychlosti a tlaku okolo určité střední hodnoty už Navier-Stokesovy rovnice použít nelze. Toto kolísání a následné průměrování, které probíhá za delší časový úsek, je zobrazeno na obrázku 12.



Obrázek 12: Kolísání rychlosti při turbulentním proudění [5]

Reynoldsovy rovnice byly odvozeny z rovnice spojitosti a Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou kapalinu, kdy Reynolds zavedl střední hodnoty rychlostí a tlaku. Vzhledem k již zmíněnému kolísání rychlosti a tlaku při turbulentním proudění Reynolds uvažoval, že součet střední hodnoty složky rychlosti \bar{v}_i , resp. tlaku \bar{p} , a příslušné fluktuace rychlosti v'_i , resp. tlaku p' se rovná okamžité hodnotě složky rychlosti v_i , resp. tlaku p [5]:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i, \quad (31)$$

$$p = \bar{p} + p', \quad (32)$$

Po dosazení těchto vztahů do Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou kapalinu a časovým zprůměrováním se obdrží Reynoldsovy rovnice [5]:

$$\rho f_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}^f}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j + \overline{v'_i v'_j})}{\partial x_j}, \quad (33)$$

kde

$$\bar{\tau}_{ij}^f = \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right). \quad (34)$$

Po vyjádření Reynoldsových tangenciálních napětí [5]:

$$\tau_{ij}^t = -\rho \overline{v'_i v'_j}, \quad (35)$$

je možné Reynoldsovy rovnice zapsat ve tvaru [5]:

$$\rho f_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij}^f + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j}. \quad (36)$$

Vzhledem tomu, že soustava třech Reynoldsových rovnic a časově zprůměrované rovnice spojitosti pro nestlačitelnou kapalinu [5]:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (37)$$

máji dohromady deset neznámých, nejsou uzavřené a nemají jednoznačné řešení. Z tohoto důvodu se doplňují turbulentními modely. Příklady turbulentních modelů jsou popsány v další kapitole.

C.4 Matematický model proudění

Matematický model v případě stacionárního proudění je rozdělen podle režimu proudění dle [5] na:

- 1) Laminární proudění
 - Metoda **DNS** (Direct Numerical Simulation) – využívá přímé řešení Navier-Stokesových rovnic.
- 2) Turbulentní proudění
 - Metoda **RANS** (Reynolds Averaged Navier-Stokes) – tato metoda je překládána jako Reynoldsovy rovnice a je již popsána v předešlé kapitole.
 - Metoda **DNS** – touto metodou je možné mimo laminárního proudění řešit i proudění turbulentní. Řešení zahrnuje všechna měřítka turbulence, a to od makroměřítka až po mikroměřítka na jehož úrovni převládají viskózní síly.
 - Metoda **LES** (Large-Eddy Simulation) – je simulace velkých vírů, tato metoda je společně s metodou DNS velice náročná na výpočetní techniku.

C.5 Turbulentní modely

Metoda RANS se dále dělí na dvě podmetody [25]:

- 1) **Metoda Reynoldsových napětí**
- 2) **Boussinesquova hypotéza** – ta uvádí, že turbulentní proudění je ve všech směrech stejné a dochází k přenosu energie od nejmenších vírů po největší. Z Boussinesquovy hypotézy vyplývá, že je možné na turbulentní proudění použít:

- 0 rovnicový model (algebraický model) – je to jednoduchý model turbulence, který neobsahuje parciální derivace, Prandtlův model směšovací délky, Prandtlův model volné smykové vrstvy,
- 1 rovnicový model – definuje kinetickou turbulentní energii k , která je řešená pomocí jedné diferenciální rovnice, Bradshawův model, Smagorinského model,
- 2 rovnicový model – obsahuje transportní rovnici kinetické turbulence a rychlost disipace energie, patří sem modely $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, Realizable $k-\varepsilon$, $k-\omega$ a mnoho dalších.

C.5.1 $k-\varepsilon$ model

Nejpoužívanějším turbulentním modelem je Launder-Spaldingův $k-\varepsilon$ model. Model předpokládá plně turbulentní proudění a je tedy použitelný při vysokých hodnotách Reynoldsova kritéria. Model vychází ze dvou rovnic, které popisují transport a difúzi kinetické energie turbulence k [5]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}^t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (38)$$

a její rychlosti disipace ε , tedy rychlosti přeměny turbulentní kinetické energie na tepelnou [5]:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij}^t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right], \quad (39)$$

kde

$$\tau_{ij}^t = -\rho \overline{v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \rho \delta_{ij}, \quad (40)$$

kde

ρ je hustota kapaliny [kg/m³],

k je kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [J/kg],

t je čas [s],

ε je disipace kinetické energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [J/kg/s],

c_{μ} , $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε jsou koeficienty $k-\varepsilon$ modelu [-],

\bar{v}_j je střední hodnota složky vektoru rychlosti [m/s],

δ_{ij} je Kroneckerovo delta [-],

τ_{ij}^t je tenzor Reynoldsových napětí [Pa],

μ_t je součinitel turbulentní viskozity [Pa.s].

Po úpravě Prandtl-Kolmogorova vztahu má k - ε model pro izotermické proudění nestlačitelné kapaliny tento tvar [5]:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \hat{L} = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, \quad (41)$$

kde

\hat{L} je turbulentní délkové měřítko [m].

Do uvedených rovnic vstupují koeficienty c_μ , $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , které byly odvozeny z jednoduchých případů turbulentního proudění. Hodnoty jednotlivých koeficientů jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Koeficienty k - ε modelu [5]

c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

C.5.2 RNG k - ε model

Vzhledem k určitým nedostatkům k - ε modelu byl pomocí statistické metody RNG (renormalization group) odvozen RNG k - ε model. Rovnice pro výpočet rychlosti disipace ε je pro zvýšení přesnosti při deformacích rozšířena o další členy R_ε a P a má tento tvar [15]:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c'_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - c'_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \rho \varepsilon - R_\varepsilon, \quad (42)$$

a rovnice kinetické energie turbulence k má také tvar [15]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \rho \varepsilon, \quad (43)$$

kde

ρ je hustota kapaliny [kg/m³],

k je kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [J/kg],

t je čas [s],

ε je disipace kinetické energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [J/kg/s],

c'_{μ} , $c'_{\varepsilon 1}$, $c'_{\varepsilon 2}$, α , β jsou koeficienty RNG $k-\varepsilon$ modelu [-],

\bar{v}_j je střední hodnota složky vektoru rychlosti [m/s],

P je produkce turbulence [-],

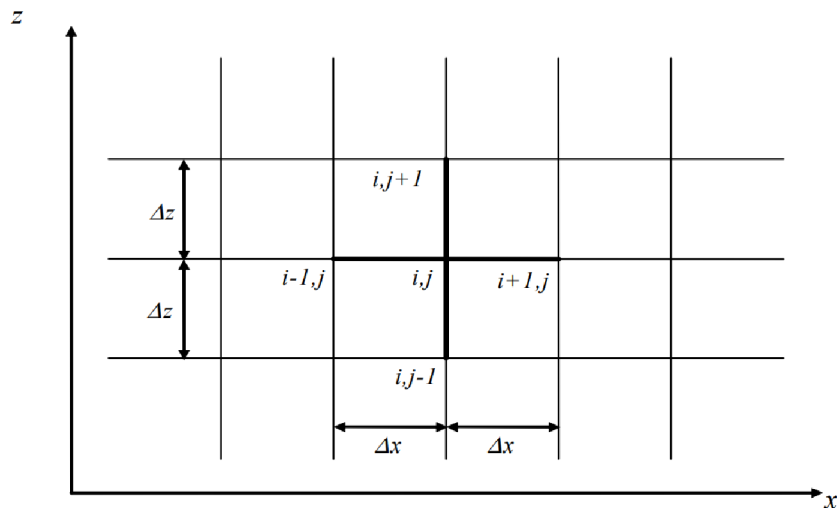
μ_t je součinitel turbulentní viskozity [Pa.s]

$$\mu_t = \mu \left(1 + \sqrt{\frac{c'_{\mu} \rho}{\mu} \frac{k}{\sqrt{\varepsilon}}} \right)^2. \quad (44)$$

C.6 Numerické metody

C.6.1 Metoda konečných diferencí

Hlavní podstata metody konečných diferencí je převedení soustavy diferenciálních rovnic na řešení soustavy algebraických rovnic, a to nahrazením parciálních derivací diferenčními podíly. Diferenční podíly, což jsou lineární kombinace funkčních hodnot hledané funkce v okolních bodech, které je aproximují, jsou získány tak, že oblast, ve které se hledá řešení, je rozdělena na konečnou množinu bodů nazývanou jako síť s příslušnými body neboli uzly. Ta může být zvolena jako pravoúhlá síť se stejným krokem Δx a Δz a označenými uzly, což je patrné na obrázku 13.



Obrázek 13: Pravoúhlá síť s označením uzlů [16]

Poté lze prostorové parciální derivace například funkce $h(x,y)$ ve směru osy x vyjádřit po úpravách první derivaci jako [16]:

$$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial x} \approx \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{2\Delta x}, \quad (45)$$

a druhou derivaci [16]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \approx \frac{h_{i+1,j} - 2 \cdot h_{i,j} + h_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (46)$$

Tato metoda je považována za jednu z nejstarších numerických metod a je díky své jednoduchosti stále využívána.

C.6.2 Metoda konečných prvků

Další používanou numerickou metodou je metoda konečných prvků. Hlavní podstata této metody je rozdělení zkoumané oblasti na jednotlivé elementy neboli konečné prvky. Tyto prvky jsou řešeny samostatně a následně jsou opět složeny, tím se obdrží výsledná soustava rovnic, která řeší celou zkoumanou oblast. Metoda má oproti metodě konečných diferencí dle [16] mnoho výhod:

- algoritmus výpočtu není závislý na tvaru řešené oblasti,
- při sestavení sítě není nutná pravidelná struktura a je tedy možné ji přizpůsobit tvaru řešené oblasti,
- zahuštění sítě v místech, kde je to zapotřebí nebo kombinace různých typů konečných prvků,
- okrajové podmínky lze snadno realizovat,
- každý konečný prvek může mít obecně různé fyzikální vlastnosti, které je na základě mezivýsledků během výpočtu možné měnit.

C.6.3 Metoda konečných objemů

Třetí používanou metodu je metoda konečných objemů a spočívá dle [26] ve třech základních bodech:

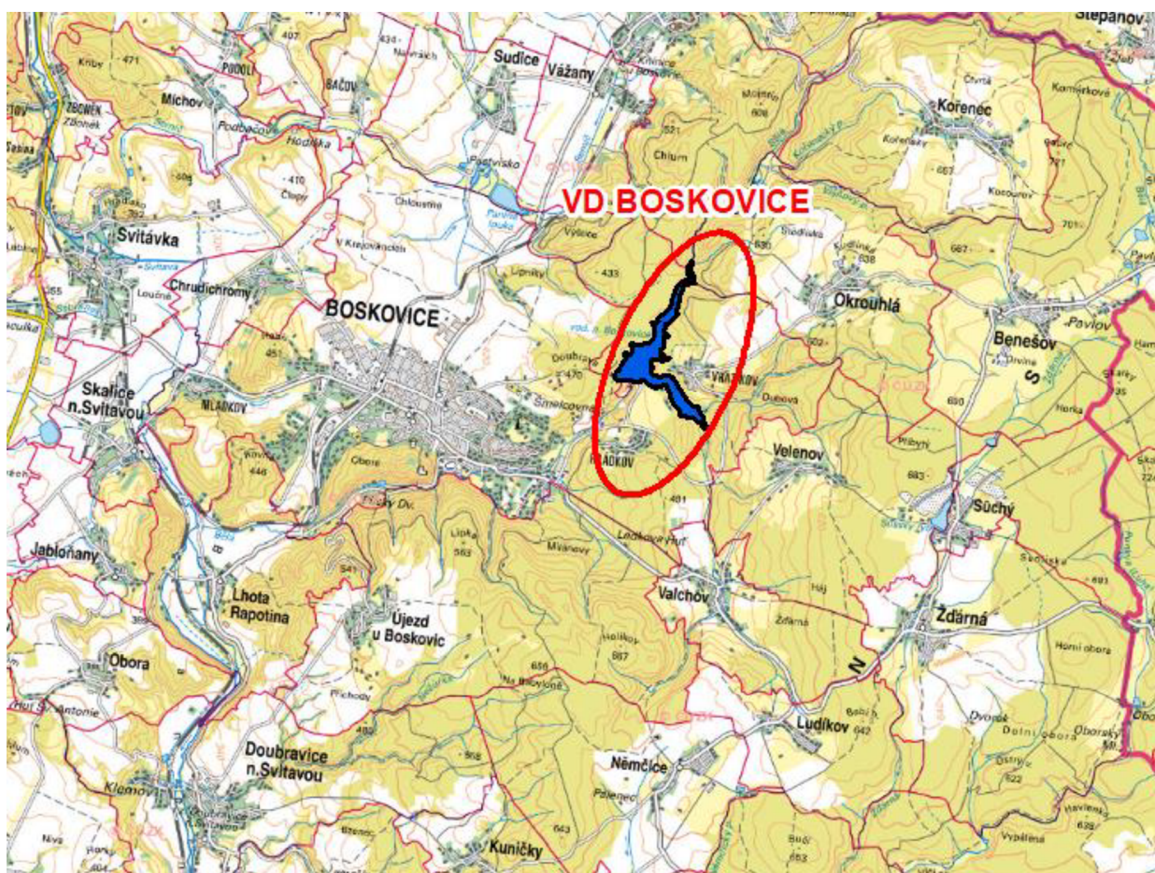
- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic

D .Vodní dílo Boskovice

Vodní dílo Boskovice je vodárenská nádrž nacházející se na toku Bělá (ř. km 7,400), téměř 600 m od zástavby obce Boskovice. VD Boskovice leží asi 14 km severně od obce Blansko v Jihomoravském kraji a je ve správě a majetku Povodí Moravy, s. p. VD Boskovice slouží jako záložní zdroj pitné vody pro zásobování Blanenska. V současnosti ale vodárenský odběr není realizován.

VD Boskovice je dle manipulačního řádu [6] zařazeno do I. kategorie, to znamená, že potenciální rozsah celkových škod při hypotetické havárii VD jsou mimořádně vysoké ekonomické škody, škody na životním prostředí a také vyvolat sociální dopady v rozsahu státu a způsobit velké ztráty na lidských životech. Požadovaná míra bezpečnosti VD tedy odpovídá KPV s dobou opakování $N = 10\,000$ let.

Parametry VD byly převzaty z manipulačního řádu VD Boskovice [6] a z dalších podkladů poskytnutých Povodím Moravy, s. p. V celé diplomové práci je použit výškový systém Balt po vyrovnání (Bpv).



Obrázek 14: Situace vnějších vztahů VD Boskovice [17]

Hlavní účel VD Boskovice [6]:

- akumulace a vzdouvání povrchových vod toku Bělá,
- odběr povrchových vod pro úpravnu vody (v současnosti není realizován),
- využití vodní energie povrchových vod v malé vodní elektrárně,

a další účely:

- nadlepšení průtoku v toku pod přehradou,
- snížení kulminačních průtoků povodňových vln neovladatelným retenčním prostorem.

D.1 Technický popis díla

D.1.1 Těleso hráze

Těleso hráze je přímá nehomogenní sypaná kamenitá hráz se středním svislým hlinitým těsněním, které je chráněno dvoustupňovým filtrem. Střední hlinité těsnění je na skalní podloží v údolí a na levém svahu napojeno pomocí betonové injekční chodby, zatímco na pravém svahu a v obou závazáních hráze je napojeno na skalní podloží pomocí injekčního bločku. Kóta koruny hráze je 432,65 m n. m. a maximální výška hráze je 42,65 m. Šířka v koruně hráze je 11,0 m. Na koruně hráze se nachází komunikace o šířce 4,0 m a chodník o šířce 1,2 m. Na návodní straně koruny hráze je vybudován vlnolam s osazenou žulovou deskou. Vlnolam převyšuje korunu hráze asi o 1,0 m. Na vzdušní straně koruny hráze je komunikace v celé délce zakončena ocelovým zábradlím. Sklon svahu návodního líce, který je opevněn tříděnou kamennou rovnatinou je v celé délce hráze 1:1,6 a je po výšce členěn lavičkami. Svah vzdušního líce je mírnější se sklonem 1:1,9 a je po celé délce stabilizován lomovým kamenem a je rovněž po výšce členěn lavičkami. Odvodnění vzdušní paty hráze zajišťuje drenážní patka. Od 08/2017 do 05/2020 probíhala celková rekonstrukce VD Boskovice. V rámci rekonstrukce došlo k vytvoření zvýšené jílocementové stěny a osazení těsnící fólie po celé délce koruny hráze. Dále došlo k opravám levobřežního závazání hráze, kdy byl po odtěžení části hráze a částečném odbourání injekčního bločku postaven bloček nový a střední hlinité těsnění bylo nahrazeno středním betonovým těsněním. Toto střední betonové těsnění bylo vystavěno až pod vozovku a následně spojeno s asfaltovými vrstvami vozovky. Maximální hladina M_{\max} byla navýšením těsnícího prvku navýšena z kóty 430,80 m n. m. na 431,40 m n. m. Současně byla navýšena i mezní bezpečná hladina MBH z kóty 430,84 m n. m. na 432,30 m n. m.

Tabulka 3: Parametry jednotlivých částí VD Boskovice dle [6]

Parametry tělesa hráze	
Kóta koruny hráze	432,65 m n. m.
Maximální výška nade dnem údolí	42,65 m
Kóta dna údolí	394,00 m n. m.
Šířka v koruně	11,0 m
Délka v koruně	305,0 m
Sklon návodního líce	1:1,6
Sklon vzdušního líce	1:1,9
Objem funkčních prostor nádrže	
Objem prostoru stálého nadržení V_s	425 000 m ³
Objem zásobního prostoru V_z	6 152 000 m ³
Objem retenčního prostoru neovladatelného V_m	796 000 m ³
Celkový objem V_c	7 373 000 m ³
Hladiny nádrže	
Kóta hladiny stálého nadržení M_s	407,00 m n. m.
Kóta hladiny zásobního prostoru M_z	430,00 m n. m.
Kóta hladiny retenčního prostoru M_m	431,40 m n. m.
Maximální hladina M_{max}	431,40 m n. m.
Mezní bezpečná hladina (MBH)	432,30 m n. m.



Obrázek 15: Vzdušní svah VD Boskovice [24]



Obrázek 16: Návodní svah VD Boskovice [24]

D.1.2 Výpustné a odběrné zařízení

Jako výpustné a odběrné zařízení slouží tzv. mokrá odběrná věž, která se nachází u pravého břehu a má výšku 44 m. Přístup do strojovny na vtokové věži je možný po ocelové lávce. Odběrná věž má obdélníkový tvar o rozměrech $4,5 \times 7,0$ m a je rozdělena na dvě souběžné šachty o rozměrech $2,0 \times 2,5$ m. Vtoková šachta každé výpusti je vybavena vodárenským etážovým odběrem DN 1000. VD Boskovice má dvě spodní výpusti DN 800 a celkovou kapacitou při max. hladině zásobního prostoru $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Vtok spodních výpustí je opatřen stavidlovou tabulí, která slouží jako návodní provozní uzávěr. Jako revizní uzávěr slouží tabule s těsněním proti vodě. Spodní výpusti jsou umístěny v chodbě o délce 185,0 m s podélným sklonem 1,11 %. Spodní výpusti jsou zakončeny regulačními kuželovými uzávěry, které jsou ovládány ze strojovny umístěné na vzdušní patě hráze a jsou vyústěny do vývaru s hloubkou 2,5 m a délkou 22,9 m.



Obrázek 17: Odběrná věž VD Boskovice [24]

D.1.3 Bezpečnostní přeliv

Jako bezpečnostní přeliv slouží kašnový nehrazený čelní obloukový přeliv, který je umístěn na levém údolním svahu. Přelivná hrana má délku 24,60 m a tvar kruhového oblouku o poloměru 23,49 m. Bezpečnostní přeliv tuto podobu získal až po celkové rekonstrukci VD Boskovice a tím nahradil původní bezpečnostní přeliv, který byl kašnový přeliv s přelivnou hranou délky 20,18 m a tvaru tzv. kačeního zobáku. Původní přeliv byl nahrazen novým z důvodu nedostatečné kapacity pro bezpečné převedení KPV s dobou opakování $N = 10\,000$ (dále pro jednoduchost označovanou jako KPV_{10 000}) přes hrázový profil. Koruna nového přelivu zůstala na stejné úrovni jako původní přelivná hrana, a to na kótě 430,00 m n. m. Přelivná hrana je řešena jako beztlaková plocha, která má přibližně tvar proudnicové přelivné plochy dle Scimemiho přecházející do roviny se sklonem 3:2. Beztlaková plocha je navržena na návrhovou výšku h_n 1,4 m, tedy na kótu hladiny 431,40 m n. m. Zaoblení návodního líce koruny přelivu má poloměr 0,6 m. Bezpečnostní přeliv je opatřen bočními protiproudě předsunutými pilíři. Původní spadiště bylo rozšířeno na 23,32 m a postupně se směrem ke skluzu zužuje až na 9,60 m. Začátek spadiště se nachází na kótě 426,15 m n. m. a má sklon 3 %.

Tabulka 4: Základní technické parametry bezpečnostního přelivu VD Boskovice [6]

Parametry bezpečnostního přelivu	
Kóta přelivné hrany	430,00 m n. m.
Délka přelivné hrany	24,60 m
Šířka přelivné hrany	1,89 m
Kóta dna na začátku spadiště	426,15 m n. m.
Šířka spadiště	9,60 – 23,32 m
Úhel zúžení spadiště	60°
Sklon spadiště	3 %



Obrázek 18: Kašnový čelní bezpečnostní přeliv [24]

D.1.4 Skluz a vývar

Spadiště bezpečnostního přelivu navazuje na skluz, který byl při rekonstrukci také pozměněn a z původních 3,5 m byl rozšířen na 9,6 m. V 1. úseku má skluz sklon 3 % a je napojen na 2. úsek skluzu se sklonem 55 % obloukem. Skluz je řešen jako otevřené betonové koryto, kdy při rekonstrukci byla část starého skluzu odbourána a nahrazena částí novou. Šířka 9,6 m je pouze v 1. úseku skluzu za spadištěm a poté se v 2. úseku jednostranně plynule zužuje, a to až do šířky 6,6 m kde je provedeno napojení skluzu na vývar. Vývar má délku 32,95 m a je proveden jako divergentní. Na konci vývaru bylo navrženo zakončení vývaru pomocí dvou prahů o stejné výšce.

Tabulka 5: Základní technické parametry skluzu a vývaru dle [6]

Parametry skluzu a vývaru	
Délka skluzu	128 m
Šířka skluzu ve dně – 1. úsek	9,6 m
Šířka skluzu ve dně – 2. úsek	6,6 – 9,6 m
Šířka lichoběžníkové horní části vývaru v úrovni terénu	6,60 – 17,20 m
Hloubka lichoběžníkové horní části vývaru	4,10 m
Sklon svahů lichob. Horní části (zborcená přímková plocha)	1:0 – 1:2
Délka vývaru (s prahem)	32,95 m



Obrázek 19: Skluz bezpečnostního objektu VD Boskovice [24]



Obrázek 20: Skluz a divergentní vývar bezpečnostního objektu VD Boskovice [24]

D.2 Hydrologické podklady

Pro numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu VD Boskovice byly základní hydrologické údaje ČHMÚ pro profil hráze VD Boskovice na toku Bělá převzaty z MŘ [6].

Tabulka 6: Hydrologické poměry [6]

Dlouhodobý průměrný průtok Q_a	0,356 m ³ /s
Dlouhodobá prům. roční výška srážek	643 mm/rok

Tabulka 7: Číselné charakteristiky m -denních průtoků dle [6]

Q_m – m -denní průtoky [m ³ /s]						
30	90	180	270	330	355	364
0,952	0,407	0,184	0,100	0,059	0,036	0,013

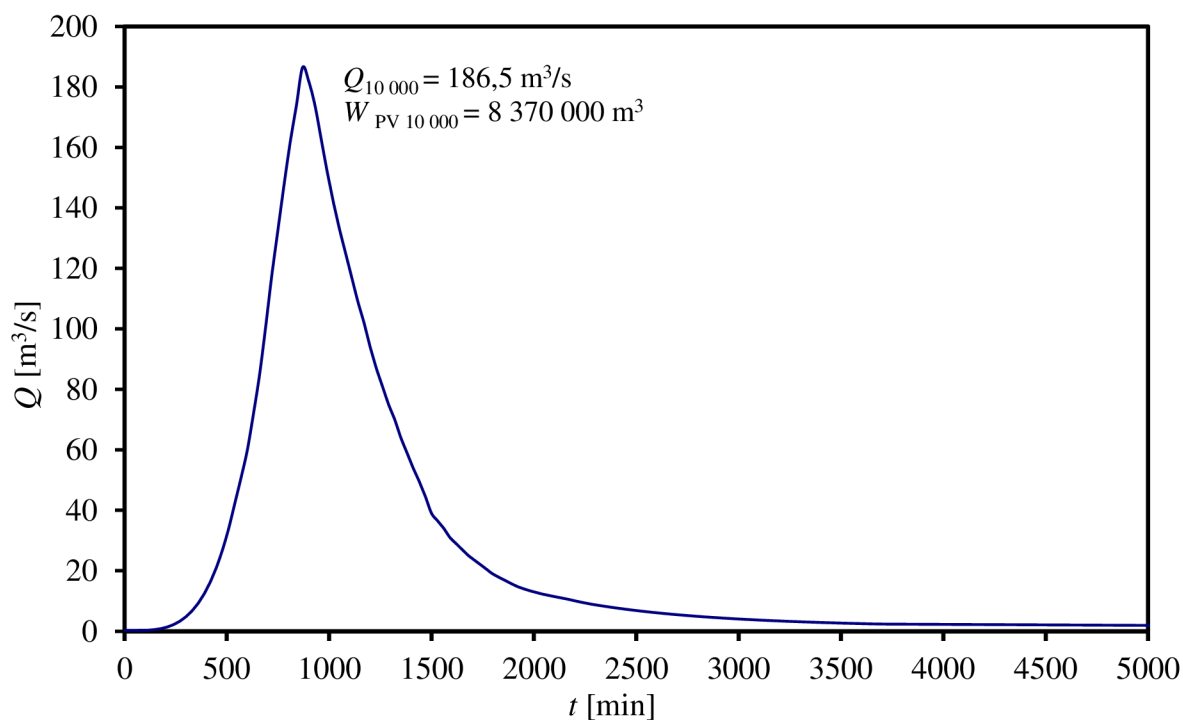
Tabulka 8: Číselné charakteristiky N -letých průtoků dle [6]

Q_N – N -leté průtoky [m ³ /s]								
20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
16,0	24,6	33,5	45,0	64,9	84,4	108,4	148,5	186,5

Tabulka 9: Číselné charakteristiky objemů N -letých teoretických PV dle [6]

W_N – objem N -leté teoretické povodňové vlny [mil. m ³]								
20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
1,870	2,460	2,955	3,575	4,535	5,260	6,100	7,290	8,370

Na obrázku 21 je zobrazen pravděpodobný průběh teoretické PV_{10 000} na Bělé v profilu hráze VD Boskovice, kdy by hladina v nádrži kulminovala na úrovni 432,10 m n. m.



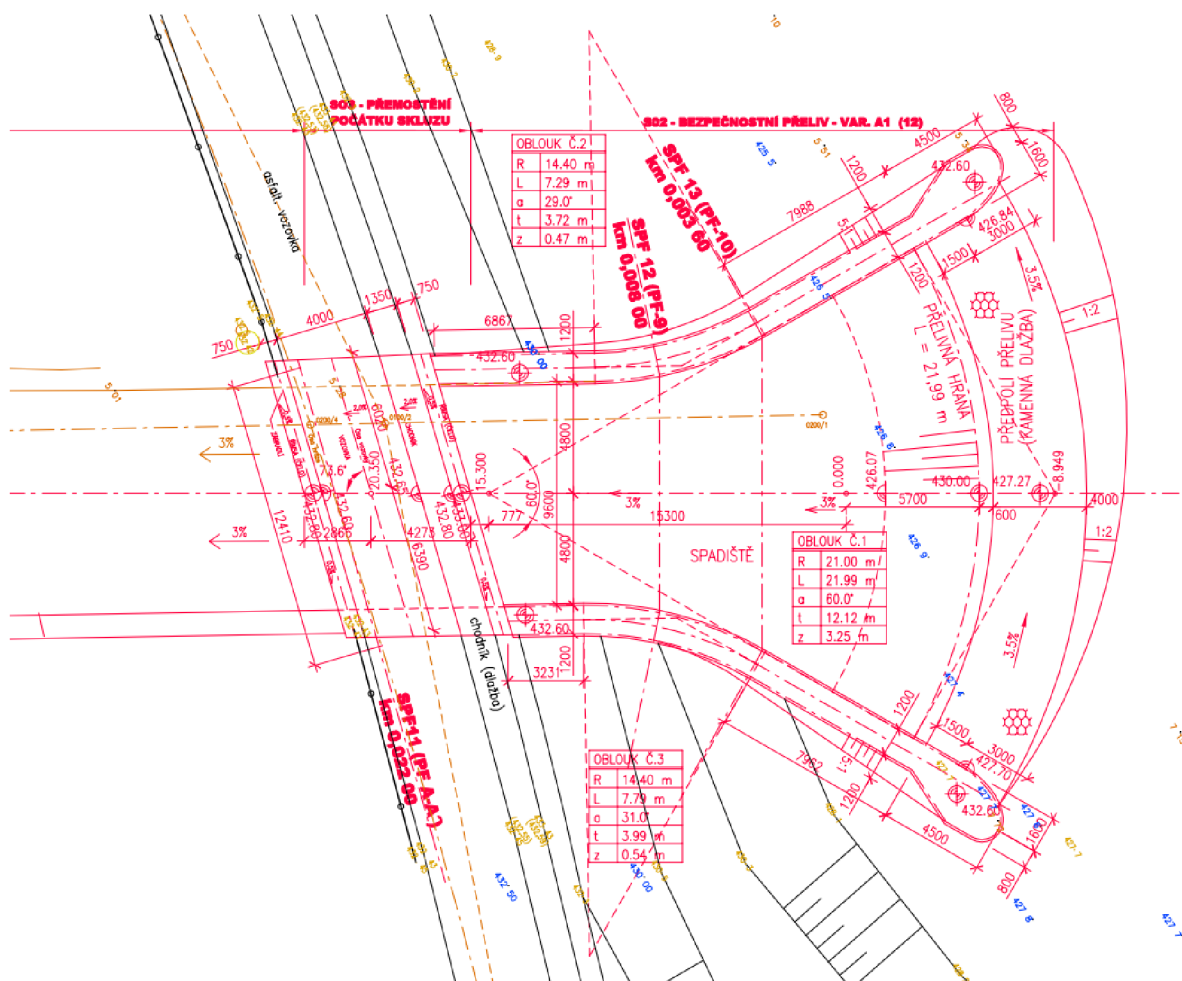
Obrázek 21: Pravděpodobný průběh teoretické PV_{10 000} na Bělé v profilu hráze VD Boskovice [6]

E. Numerické modelování proudění vody

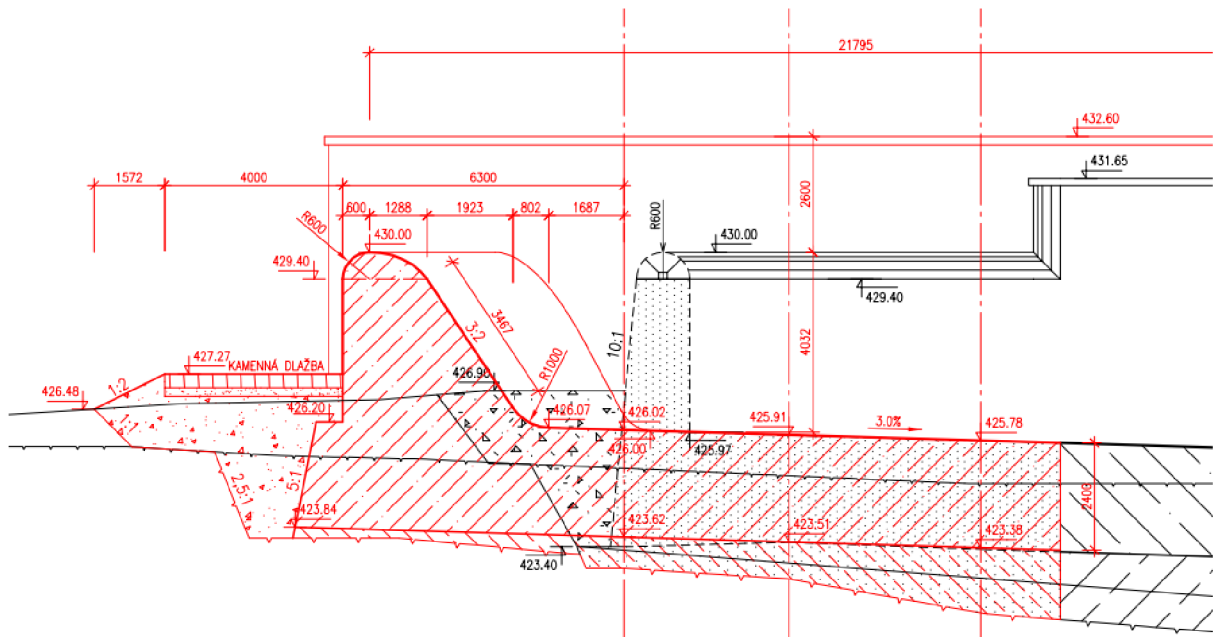
E.1 Tvorba virtuálního 3D modelu

Na tvorbu virtuálního 3D modelu bezpečnostního přelivu, spadiště a části skluzu VD Boskovice byl využit software AutoCAD 2020 od společnosti Autodesk, Inc., a to pomocí bezplatné studentské verzi, kterou tato společnost poskytuje. AutoCAD je software CAD (Computer-Aided Design) a slouží pro projektování a konstruování ve 2D a 3D.

Výkresy bezpečnostního objektu VD Boskovice a další potřebné podklady byly poskytnuty Povodím Moravy, s. p. Hlavními podklady použitými pro vytvoření virtuálního 3D modelu posloužily výkresy půdorysu BP, skluzu a výkres podélného řezu BP, které byly použity i pro zhotovení fyzikálního modelu při Hydraulickém modelovém výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7] na Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v roce 2013. Půdorys BP a skluzu jsou částečně zobrazeny na obrázku 22 a podélný řez BP je zobrazen na obrázku 23.



Obrázek 22: Půdorys bezpečnostního přelivu a části skluzu VD Boskovice [12]

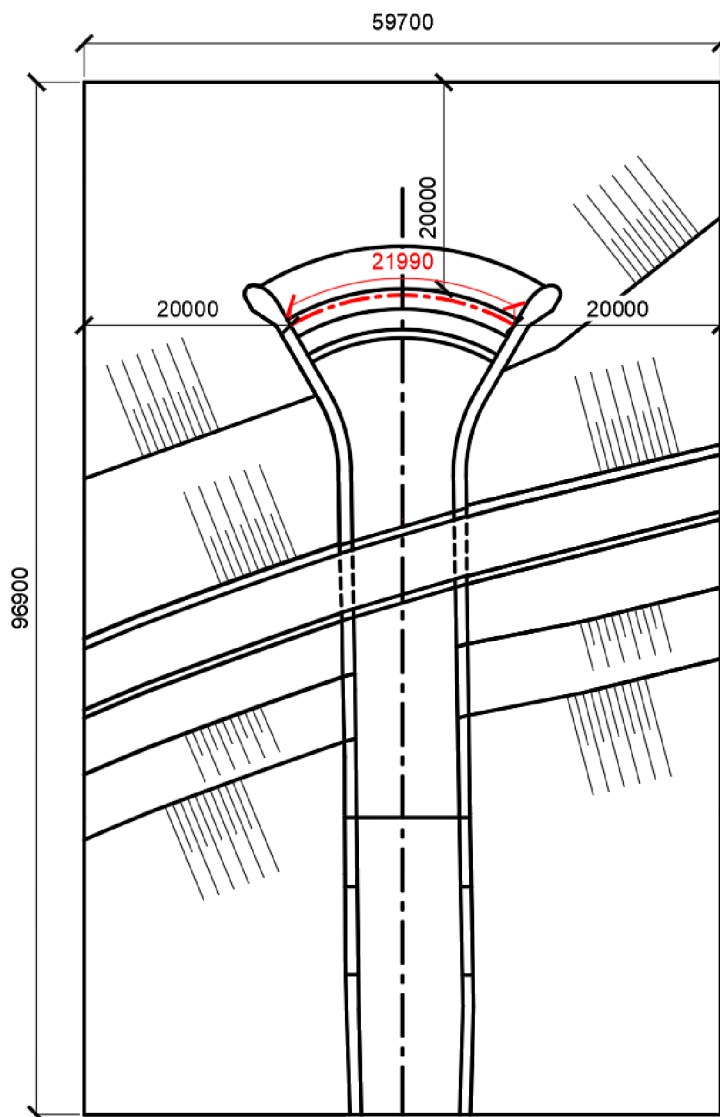


Obrázek 23: Podélný řez BP a spadiště v rovině symetrie [12]

Délka přelivné hrany přelivu uvedené na obrázku 22 je **21,99 m**, což neodpovídá skutečné délce přelivné hrany přelivu, který byl v rámci rekonstrukce VD Boskovice vybudován, jehož délka je **24,60 m**. Je to z toho důvodu, že se při rekonstrukci přelivu VD Boskovice bral v úvahu závěr Hydraulického modelového výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7], z kterého mimo jiné vyplývá, že přelivem s délkou přelivné hrany 21,99 m lze při mezní bezpečné hladině převést průtok pouze $Q = 167,0 \text{ m}^3/\text{s}$. VD Boskovice je ale zařazeno do I. kategorie a mělo by tedy být schopno bezpečně převést přes hrázový profil kontrolní povodňovou vlnu $KPV_{10\,000}$ s kulminačním průtokem $Q_{10\,000} = 186,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Vzhledem k tomuto faktu bylo pro převedení $Q_{10\,000}$ při mezní bezpečné hladině doporučeno prodloužení délky přelivné koruny **na 24,6 m** a to pomocí posunutí přelivu a bočních piliřových stěn směrem do prostoru nádrže o **2,49 m**. Ve virtuálním 3D modelu je délka přelivu 21,99 m, tedy stejná jako jeho délka v Hydraulickém modelovém výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7], aby bylo možné modely vzájemně porovnat.

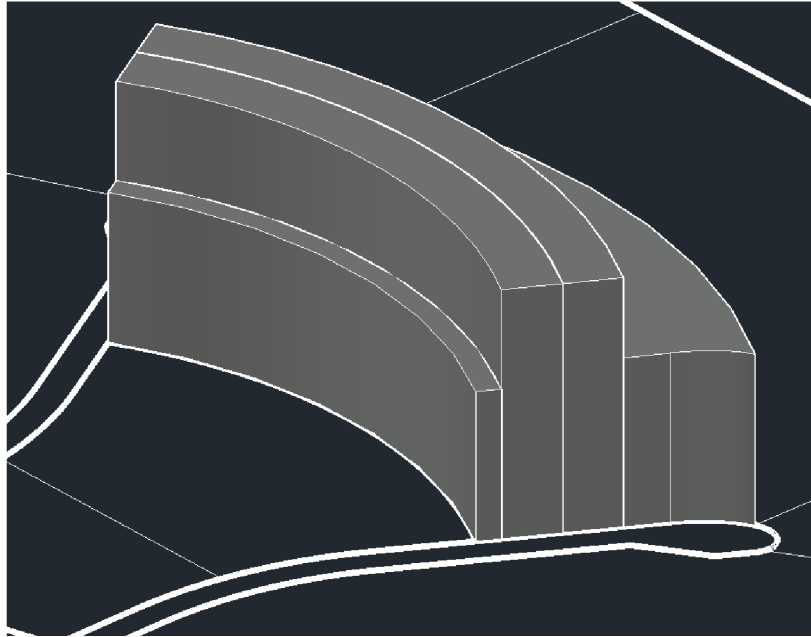
V softwaru AutoCAD byl nejprve v pracovním prostředí *Kreslení a poznámka* upraven výkres půdorysu přelivu, spadiště, části skluzu a jejich okolní terén. Vzdálenost vykreslení terénu v okolí konstrukce přelivu bylo nutné volit tak, aby nedošlo při numerickém modelování proudění k ovlivnění výpočtu. Okolí přelivu je nutné vykreslit minimálně ve vzdálenosti $3h$ (přepadová výška přepadového paprsku) od konstrukce přelivu. Je ale vhodné přednostně volit výrazně větší vzdálenost, jelikož je výhodnější vymodelovat větší oblast a při numerickém modelování proudění ji celou nevyužít než ji poté pracně dodatečně dodělat. Konkrétně v případě bezpečnostního přelivu VD Boskovice byla tato oblast v předpolí přelivu zvolena

20 m. Délka skluzu byla zvolena tak, aby následně při zadávání okrajových podmínek u numerického modelování proudění nedošlo k ovlivňování simulované hladiny.



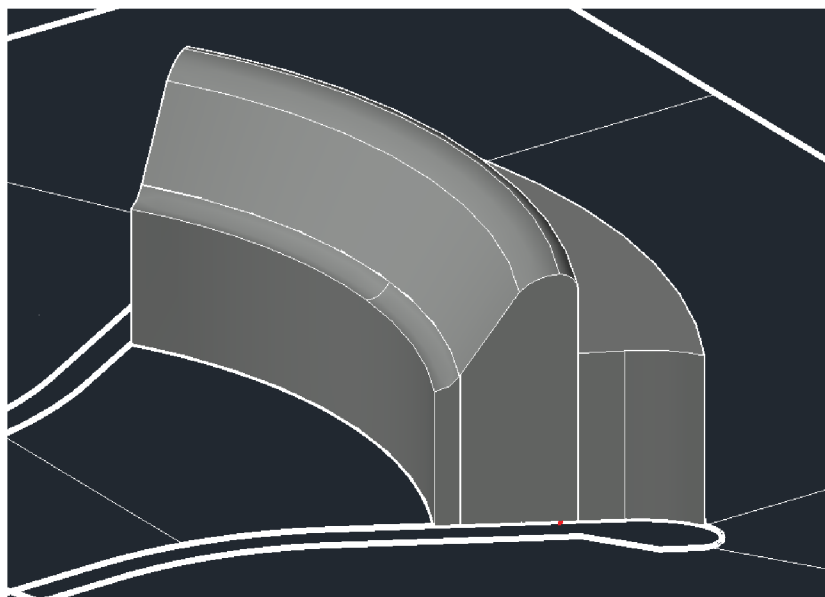
Obrázek 24: Upravený půdorys přelivu a skluzu VD Boskovice pro tvorbu 3D modelu

Po úpravě výkresu půdorysu přelivu a skluzu zobrazeném na obrázku 24 byl postupně vytvářen virtuální 3D model bezpečnostního přelivu (s délkou přelivné hrany 21,99 m), spadiště a části skluzu VD Boskovice. Vytváření 3D modelů je v softwaru AutoCAD umožněno po přepnutí pracovního prostředí na *3D modelování* případně na *3D základní*. Model byl vytvořen z jednotlivých 3D těles, která byla vytvořena pomocí příkazu *Presspull*. Podoba konstrukce přelivu vytvořená tímto příkazem je zobrazena na obrázku 25.



Obrázek 25: Vytvořená konstrukce přelivu bez úpravy

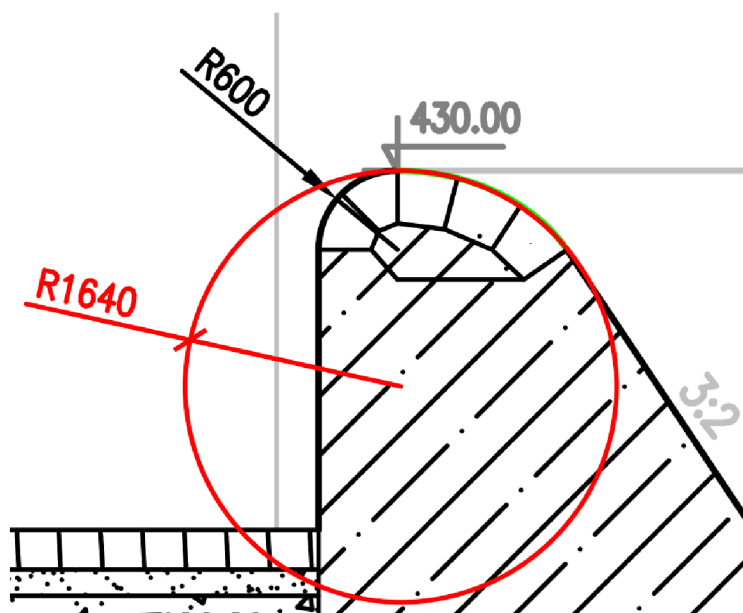
Tyto jednotlivá 3D tělesa byla dále upravena do podoby skutečného provedení, a to pomocí mnoha různých příkazů jako například *Zaoblit hranu*, *Zkosit hranu* a *Rozdíl*. Pro příklad je na obrázku 26 zobrazena konstrukce přelivu po těchto úpravách.



Obrázek 26: Vytvořená konstrukce přelivu po úpravě

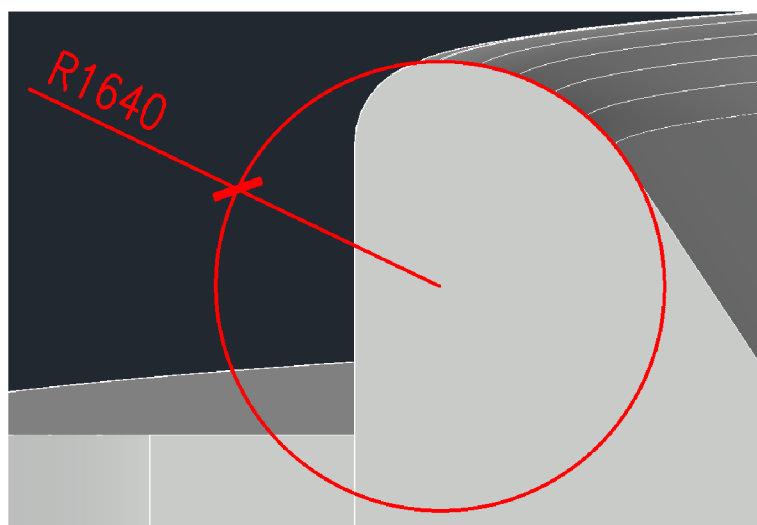
Při vytváření virtuálního 3D modelu je dále také dobré pamatovat na to, že po dokončení bude model následně vložen do výpočetního programu, ve kterém bude vytvořena výpočetní síť. Ta je složena z jednotlivých buněk různé velikosti, kterou je možné předem nastavit. Výpočetní síť ale není schopna zcela přesně popsat například tvar proudnicové přelivné plochy přelivu, a to ani při jejím přesném vymodelování. Z tohoto důvodu byla proudnicová přelivná

plocha přelivu, která se blíží svým tvarem proudnicové přelivné ploše dle Scimemiho, v příčném řezu zjednodušená částí kružnice o poloměru 1,64 m. Zaoblení návodního líce koruny přelivu o poloměru 0,60 m zůstalo nezměněno. Rovněž i kóta koruny přelivu zůstala na původní navržené hodnotě 430,00 m n. m. Upravena byla tedy pouze část proudnicové přelivné plochy, a to od koruny přelivu až po přechod proudnicové plochy na vzdušní líc přelivu se sklonem 3:2. Jak je patrné z obrázku 27 je tato úprava téměř zanedbatelná a neměla by tedy zásadně ovlivnit hodnotu součinitele přepadu při numerickém modelování proudění. Původní tvar je zobrazen zelenou barvou a upravený tvar červenou barvou.



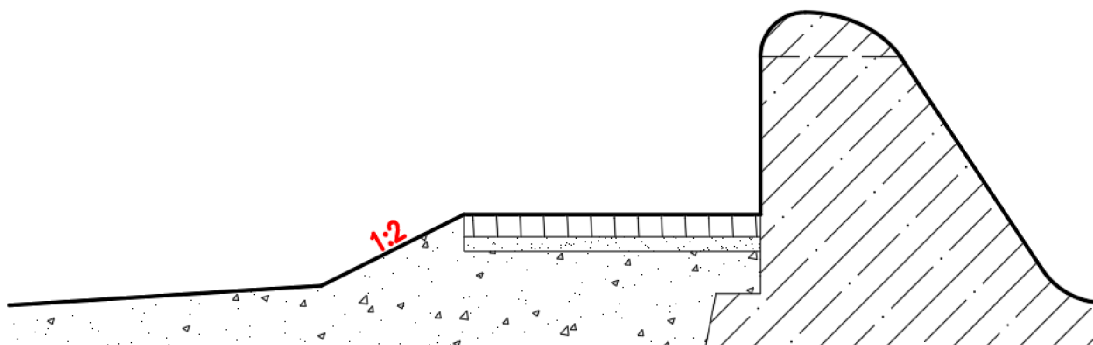
Obrázek 27: Detail upraveného tvaru přelivu

Pro porovnání tvaru přelivu vymodelovaného pomocí softwaru AutoCAD s výkresem upraveného přelivu je na obrázku 28 zobrazen detail přelivu virtuálního 3D modelu.



Obrázek 28: Detail přelivu na virtuálním 3D modelu

Z důvodu zjednodušení výpočtu numerického modelování proudění byl při tvorbě modelu terénu v předpolí přelivu změněn sklon napojení kamenné dlažby na terén dna nádrže, a to tak, že na místo sklonu 1:2 bylo uvažováno přímé napojení na dno nádrže. Na obrázku 29 je zobrazena původní podoba napojení kamenné dlažby na terén dna nádrže. Upravená podoba je zobrazena na obrázku 30.



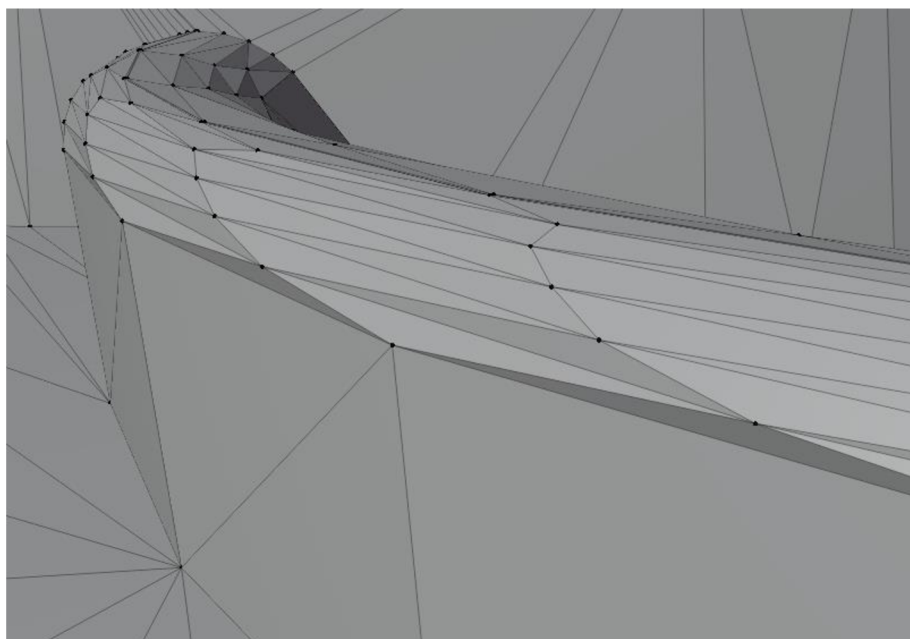
Obrázek 29: Původní podoba napojení kamenné dlažby na dno nádrže [12]



Obrázek 30: Upravená podoba napojení kamenné dlažby na dno nádrže

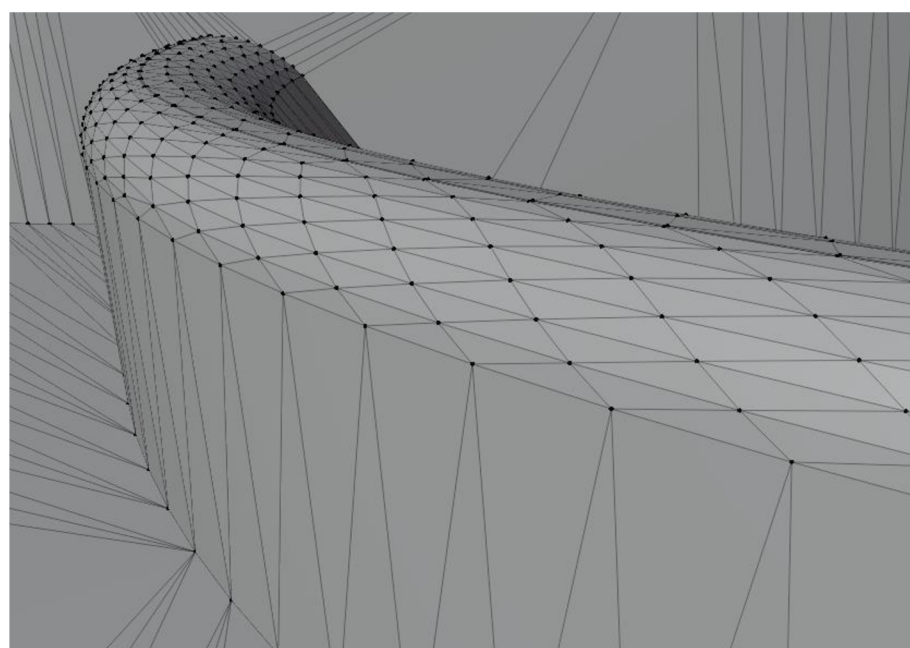
Dalším uvažovaným zjednodušením virtuálního 3D modelu bylo, že místo svahu návodního líce po výšce členěného lavičkami vytvořen návodní líc jednotného sklonu bez laviček.

Ještě před vyexportováním dokončeného virtuálního 3D modelu bylo nutné ho upravit tak, aby co možná nejvíce odpovídal reálnému provedení, a to pomocí příkazu *Facetres*, který upravuje vyhlazení stínovaných rendrovaných objektů, rendrovaných stínů a objektů se skrytými hranami. Původní nastavení vyhlazení v softwaru AutoCAD je pro následnou simulaci naprosto nedostačující, a to z důvodu například chybného napojení návodního líce přelivu s korunou přelivu nebo nesprávného zaoblení půdorysu přelivu. V softwaru AutoCAD to není tak patrné jako například v softwaru Blender, který byl následně použit na kontrolu virtuálního 3D modelu. Podoba přelivu s původním nastavením je zobrazena na obrázku 31.



Obrázek 31: Podoba přelivu s původním nastavením vyhlazení

Aby tedy virtuální 3D model co nejvíce odpovídal reálnému provedení, bylo zvoleno maximální vyhlazení. Podoba přelivu po maximálním vyhlazení je zobrazena na obrázku 32.



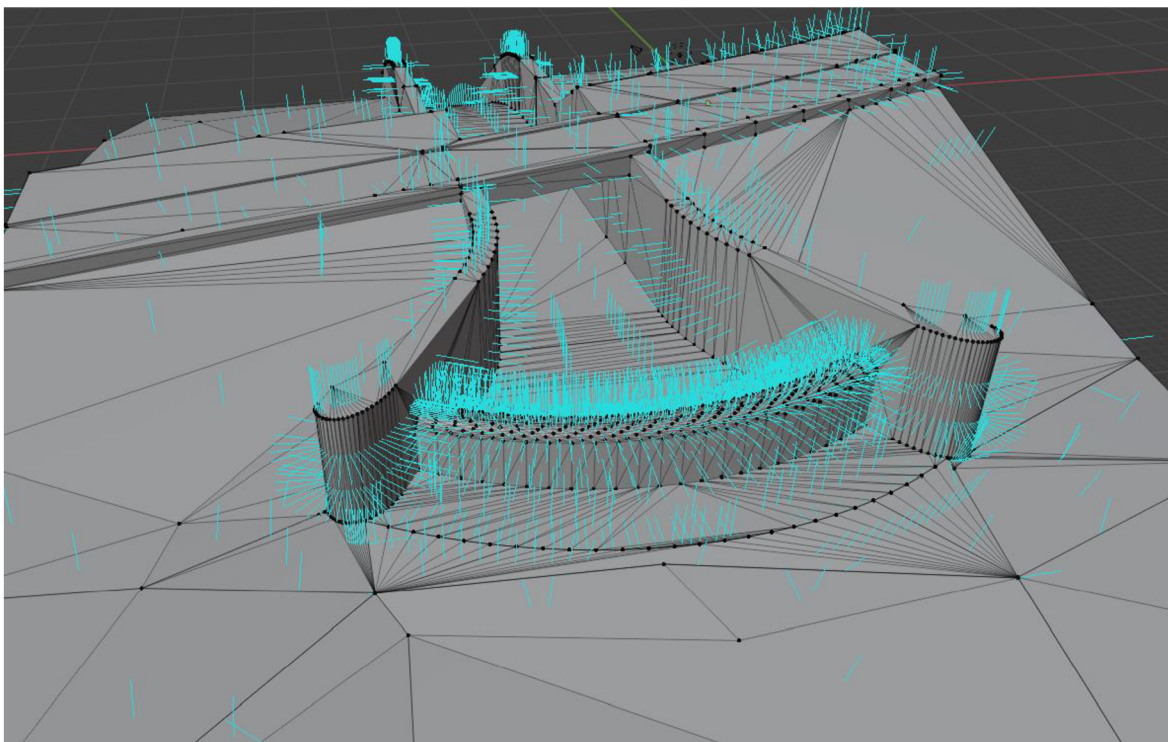
Obrázek 32: Podoba přelivu s maximálním vyhlazením

Po těchto úpravách byl dokončený model v softwaru AutoCAD exportován z formátu dwg do formátu stl, který je nutný pro následné úpravy a kontrolu v softwaru Blender.

E.2 Kontrola a úprava virtuálního 3D modelu

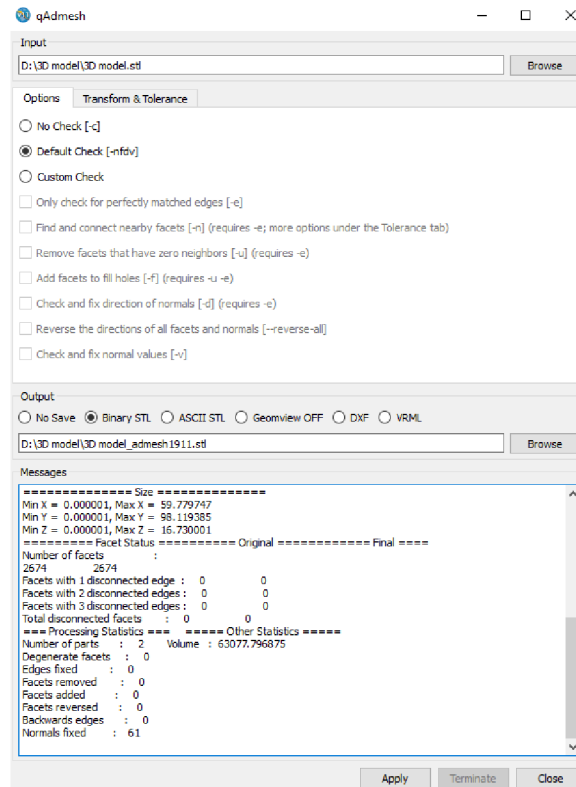
Na kontrolu a úpravu vytvořeného virtuálního 3D modelu bezpečnostního přelivu VD Boskovice byl využit software Blender v2.90 od neziskové organizace Blender Foundation. Blender je bezplatná open source aplikace sloužící mimo jiné k vytváření 3D modelů, animací, úpravě videí, a dokonce i tvorbě her.

Při tvorbě nebo exportu 3D modelu může dojít k mnoha různým chybám od chybného směru normál (přímka kolmá na plochu, která by měla směřovat ven z modelu), chybějících ploch nebo nesprávného propojení jednotlivě vytvořených těles. Tyto chyby je nutné opravit, protože by následně při numerickém modelování proudění mohly mít nepříznivý vliv na výsledné hodnoty nebo může například docházet v případě chybějící plochy nebo nesprávného napojení hran k protékání vody do modelu. Na obrázku 33 je zobrazen model s modře znázorněnými normálami.



Obrázek 33: 3D model s modře znázorněnými normálami

Vzhledem k tomu, že správnost 3D modelu je při numerickém modelování proudění zásadní, byl 3D model opět zkontrolován a opraven přímo v programu Flow-3D, který to umožňuje pomocí nástroje *qAdmesh*. Na obrázku 34 je zobrazena výstupní zpráva kontroly nástroje *qAdmesh*, z které vyplývá, že je model již v pořádku.



Obrázek 34: Zpráva kontroly nástroje qAdmesh

E.3 Modelování proudění

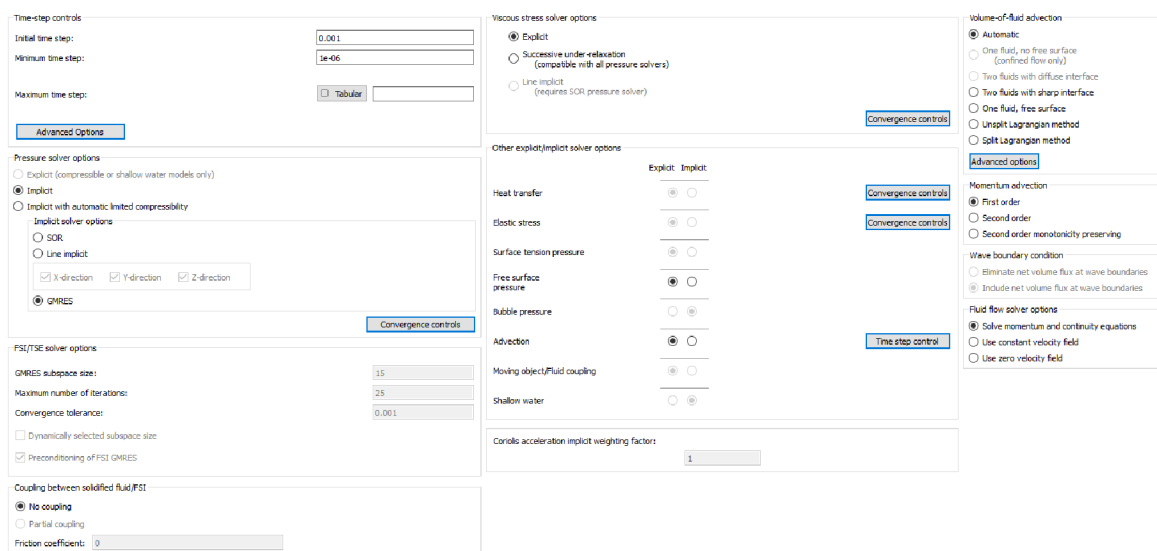
Pro numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu VD Boskovice byl zvolen program Flow-3D v11.0.4. od společnosti Flow Science Inc. Flow-3D je velice výkonný program simulující proudění tekutin, přenos tepla, pohyb těles a mnoho dalších fyzikálních procesů. Hlavní odlišností od ostatních programů simulujících proudění tekutin je v chování volné hladiny.

Volné hladiny jsou určovány speciální metodou Volume of Fluid (VOF) vyvinutou skupinou vědců, mezi kterými byl i zakladatel společnosti Flow Science Inc. K definici geometrie těles uvnitř výpočetní sítě je ale využívána jiná speciální metoda, a to FAVOR™ (Fractional Area Volume Obstacle Representation). Podstata této speciální techniky spočívá v tom, že algoritmy numerického řešení obsahují pro každý kontrolní objem informace o veličinách jako je např. tlak, rychlost a teplota. Dále také zachovává geometrické tvary se zahrnutím průměrných veličin v kontrolních objemech [11]. Pro řešení využívá Flow-3D numerickou metodu konečných objemů.

E.3.1 Nastavení numerického modelu

Před spuštěním samotného výpočtu simulace předchází definování mnoha různých specifikací a nastavení, která mají vliv na následný průběh, správnost a délku výpočtu.

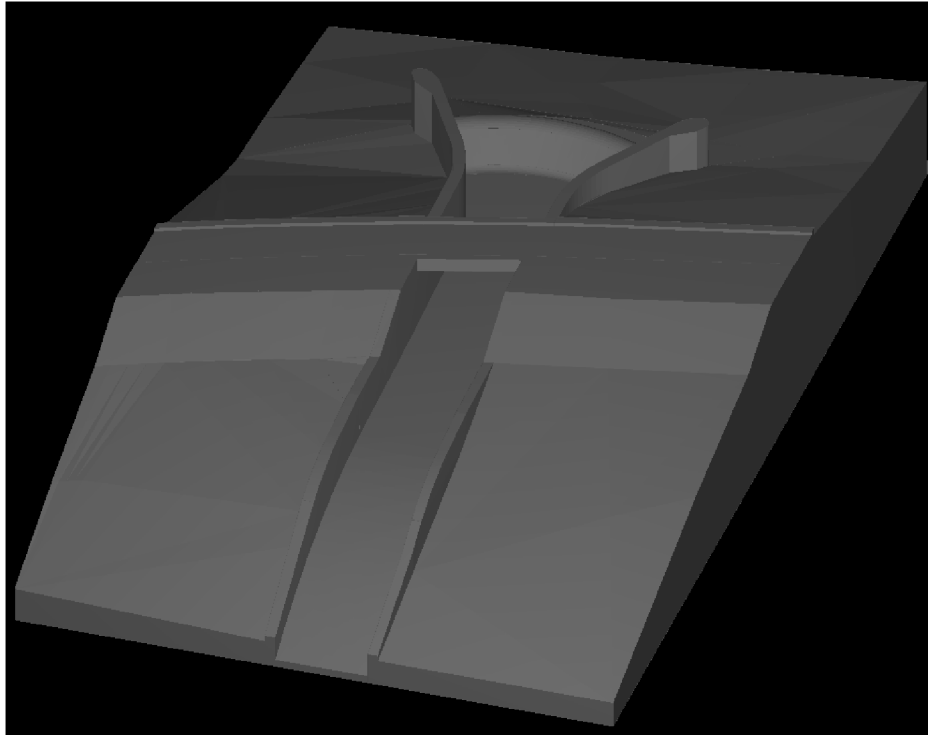
Jednou z těchto specifikací a nastavení je určení dostatečné délky simulace proudění, tak aby v průběhu této doby došlo k ustálení simulace proudění. Konkrétně v tomto případě byla délka simulace zvolena na 60 s. Nicméně, aby nebylo nutné simulovat proudění celých 60 s, ale simulovat proudění pouze do doby ustálení, byla nastavena podmínka, že v případě, kdy dojde k ustálení bude výpočet zastaven. Počáteční časový krok (Initial time step) byl nastaven na 1 ms a minimální časový krok (minimum time step) na 1 μ s, což je mimo jiné zobrazeno na obrázku 35.



Obrázek 35: Nastavení časového kroku

Při simulaci byla zvolením *Free surface or sharp interface a Incompressible* uvažována simulace volné hladiny a nestlačitelné kapaliny. Při simulaci bylo uvažováno pouze s jednou kapalinou, jejíž vlastnosti odpovídají vodě o teplotě 20° C. Dále byla zvolena velikost gravitačního zrychlení, která odpovídá hodnotě uvažované v zeměpisných šířkách České republiky, a to 9,81 m/s². Směr gravitačního zrychlení byl na základě použitého souřadného systému virtuálního 3D modelu zvolen ve směru záporné osy *z*. Na numerické modelování proudění byl použit turbulentní 2 rovnicový model RNG $k - \epsilon$.

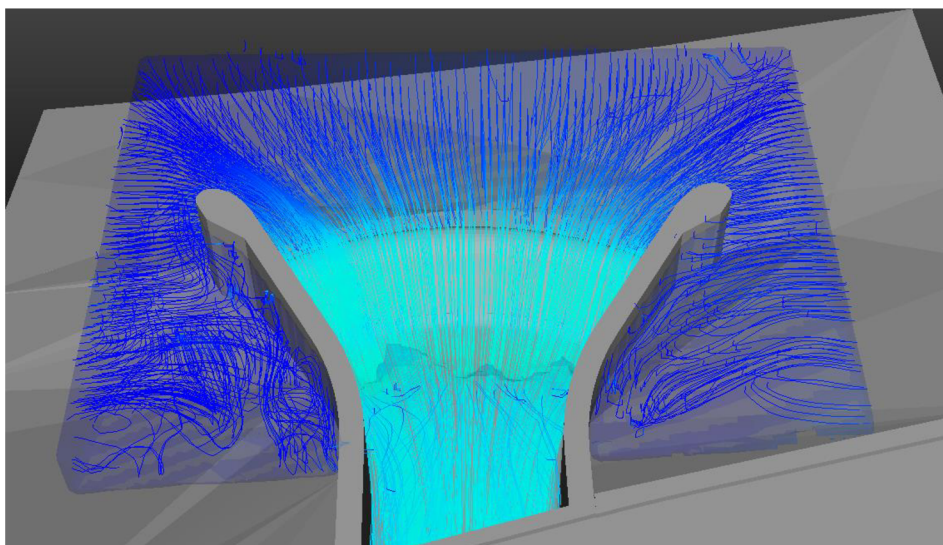
Po těchto zásadních krocích mohl být virtuální 3D model, který byl již pomocí softwaru Blender a pomocí softwaru Flow-3D zkontrolovaný a opravený, vložen do Flow-3D. Jeho podoba je zobrazena na obrázku 36.



Obrázek 36: Zkontrolovaný a opravený model vložený do Flow-3D

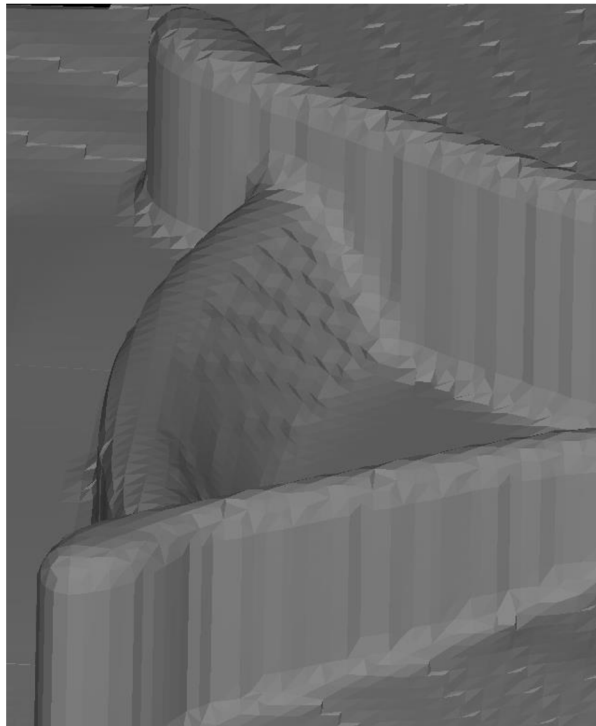
E.3.2 Vytvoření výpočetní sítě

Správné vytvoření výpočetní sítě příkazem *mesh block* je při následné simulaci proudění velice důležitý krok, a to z důvodu zvolení vhodných rozměrů výpočetní sítě, aby síť zahrnula dostatečně velkou oblast, ale současně aby nebyla nepotřebně veliká a tím bez jakéhokoliv zpřesnění výpočtu prodlužovala následnou dobu výpočtu. Z tohoto důvodu byla velikost výpočetní sítě pomocí předběžných výpočtů postupně upravována. Jak je možné vidět na obrázku 37, výpočetní síť bylo nutné v oblasti bezpečnostního přelivu zvětšit (zjemnit) tak, aby nedocházelo k ovlivňování průtoku.



Obrázek 37: Nevhodně zvolená velikost mesh blocku

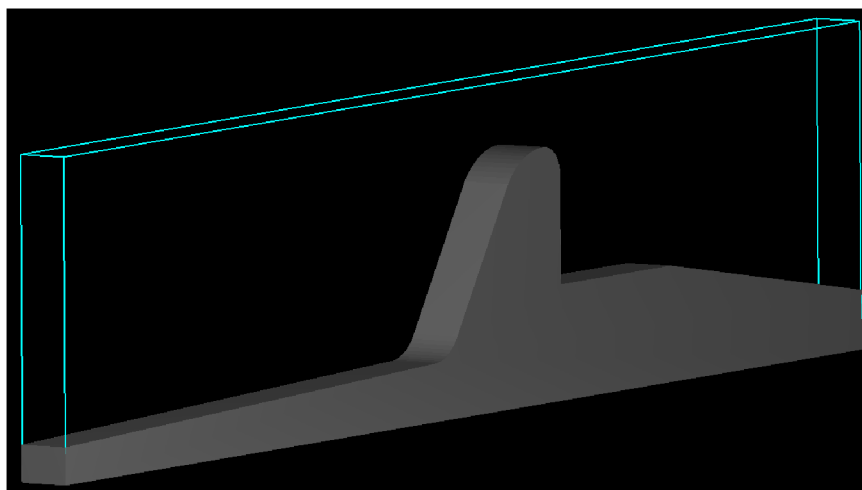
U velikosti buněk výpočetní sítě také platí, že pokud bude jejich velikost příliš velká, nebude dostatečně přesně popsán například tvar přelivu, což je patrné z obrázku 38, kde je zobrazen přeliv pomocí již zmíněné metody FAVOR™.



Obrázek 38: Přeliv zobrazený metodou FAVOR™ při velikosti buňky 0,5 m

Při takovéto nevhodně zvolené velikosti buněk, kdy tvar přelivu zcela viditelně neodpovídá skutečnému provedení, by nebyly výsledky výpočtu příliš spolehlivé. Pokud se ale zvolí naopak příliš malá velikost buněk výpočetní sítě bez jakéhokoli většího zpřesnění výpočtu, mělo by to opět za následek bezúčelné prodloužení času následného výpočtu.

Ke stanovení vhodné velikosti buněk výpočetní sítě v okolí přelivu byl využit zjednodušený model přelivu. Hladina vody před přelivem byla zvolena tak, aby odpovídala výšce přepadového paprsku přelivu 1,0 m. Zjednodušený model je zobrazen společně s výpočetní sítí na obrázku 39.



Obrázek 39: Zjednodušený model BP

Na tomto zjednodušeném modelu byly postupně měněny velikosti buněk výpočetní sítě a následně porovnávány jednotlivé průtoky odpovídající různým velikostem buněk s průtoky vypočítanými pomocí hydraulických výpočtů s použitím součinitelů přepadu podle různých autorů. Nejvíce se průtoku ve Flow-3D přibližoval průtok s použitím součinitele přepadu určeného podle doc. Stary a RNDr. Koutkové [3] a podle Rouve a Indlekoref [13], jejichž tvary jsou uvedeny v kapitole B.3.4 Součinitel přepadu (rovnice 8 a 10). Toto porovnání je uvedeno v tabulce 10 s výsledky pro 1 m běžný šířky přelivu.

Tabulka 10: Porovnání průtoku na zjednodušeném modelu BP s hydr. výpočtem

Velikost buněk	Flow-3D	doc. Stara a RNDr. Koutková [3]		Rouve a Indlekoref [13]			
	Q	Q	Rozdíl	Rozdíl	Q	Rozdíl	Rozdíl
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,2	2,0702	1,9423	0,1279	6,58	1,9353	0,1349	6,97
0,1	2,0212		0,0789	4,06		0,0859	4,44
0,05	2,0102		0,0679	3,50		0,0749	3,87
0,025	2,0062		0,0629	3,29		0,0699	3,61

Velikost buňky výpočetní sítě byla na základě analýzy zvolena na hodnotu 0,05 m. V případě zvolení menší velikosti buňky by již nedošlo k výrazné změně velikosti průtoky, ale prodloužila by se pouze délka výpočtu. Pokud by však velikost buněk 0,05 m byla využita u všech vytvořených výpočtových sítí, poté by byl celkový počet buněk asi 220 000 000, což bylo samozřejmě vzhledem k dostupné výpočetní technice zcela nepřijatelné. Vzhledem tedy k velikosti vytvořeného modelu bezpečnostního objektu VD Boskovice byla velikost buněk výpočetní sítě 0,05 m použita pouze pro popis tvaru předsunutých pilířů, přelivu a jeho blízkého okolí. Pro ostatní vytvořené výpočtové sítě byla velikost buněk zvolena 0,18 m a 0,15 m.

Drsnost povrchu u Hydraulického modelového výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7] byla uvažována pro betonový povrch pro celý model. V případě virtuálního 3D modelu byla drsnost povrchu uvažována rovněž jednotná pro celý model. Vzhledem k tomu, že software Flow-3D využívá k definování drsnosti Nikuradseho k , byla drsnost dle Manninga n přepočtena pomocí tohoto vztahu [21]:

$$k \approx \left(\frac{n}{0,0389} \right)^6, \quad (47)$$

kde

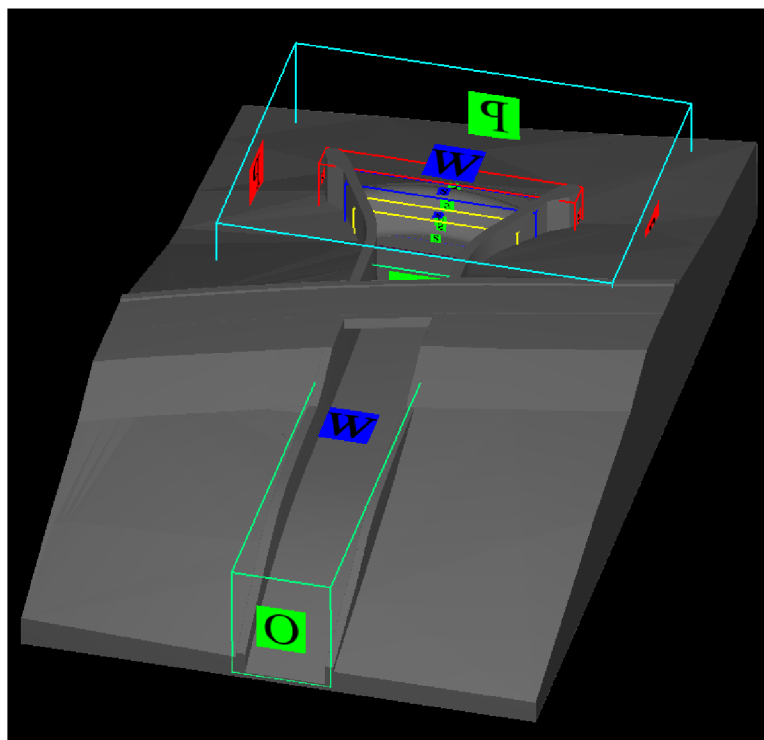
n je součinitel drsnosti dle Manninga [-].

Vzhledem k tomu, že byla u fyzikálního modelu uvažována drsnost v rozmezí dle Manninga $n = 0,014 \div 0,017$ po přepočtu na zmenšený model $n_m = 0,009 \div 0,010$ byla provedena citlivostní analýza vlivu drsnosti na průtok. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty průtoků jednotlivých drsností a jejich rozdíly od předchozí hodnoty. Z těchto rozdílů je patrné, že se průtok mění pouze minimálně, což je dáno použitou velikostí buňky výpočetní sítě, která není zcela schopna tuto drsnost povrchu dostatečně popsat.

Tabulka 11: Citlivostní analýza vlivu drsnosti na průtok

Drsnost	Q	Rozdíl	Rozdíl
[-]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0	2,0204	-	-
0,014	2,0102	0,0102	0,51
0,017	2,0012	0,0090	0,44

K popisu tvaru modelu bylo vytvořeno pět síťových bloků výpočetové sítě (mesh blocků). Mesh block 1 popisuje okolí BP a také spadiště. Vzhledem k již zmíněnému velkému množství buněk při volbě velikosti buněk 0,05 m na všechny vytvořené mesh blocky, bylo na popis tvaru předsunutých piliřů, přelivu a jeho blízkého okolí použity tři mesh blocky. Díky tomuto rozdělení na tři mesh blocky bylo dosaženo výrazného snížení celkového počtu buněk z asi 20 800 000 na asi 15 100 000, což výrazně snížilo dobu výpočtu. K popisu tvaru celého skluzu posloužil mesh block 5. Všechny vytvořené mesh blocky jsou společně s okrajovými podmínkami zobrazeny na obrázku 40.



Obrázek 40: Mesh blocky se zobrazenými okrajovými podmínkami

Velikosti buněk, rozměry a počet buněk jednotlivých mesh blocků jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12: Parametry jednotlivých mesh blocků

Mesh block	Velikost buněk [m]	Rozměry			Počet buněk
		X [m]	Y [m]	Z [m]	
1	0,18	46,0	35,0	11,0	3 100 000
2	0,05	29,8	3,1	5,9	4 400 000
3	0,05	22,2	2,8	6,2	3 100 000
4	0,05	19,0	2,3	4,8	1 700 000
5	0,15	11,5	58,0	13,5	2 800 000

U každého mesh blocku byly zadány okrajové podmínky, které jsou jednotlivě uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13: Okrajové podmínky jednotlivých mesh blocků

Mesh block	Okrajové podmínky					
	X Min	X Max	Y Min	Y Max	Z Min	Z Max
1	P	P	S	P	W	W
2	S	S	S	S	S	S
3	S	S	S	S	S	S
4	S	S	S	S	S	S
5	S	S	O	S	W	W

kde

- S – Symmetry (symetrie): zajišťuje stejné podmínky proudění před i za stěnou výpočetní sítě.
- P – Specified pressure (specifický tlak): slouží pro nastavení počáteční podmínky, například úrovně hladiny v nádrži.
- W – Wall (zeď): představuje nepropustnou hranici výpočetní sítě.
- O – Outflow (odtok): volný odtok kapaliny z modelu.

Počáteční podmínky v X Min, X Max a Y Max byly v případě mesh bloku 1 nastaveny na shodnou hodnotu odpovídající výšce přepadového paprsku přelivu 2,30 m, což je výška přepadového paprsku při dosažení hodnoty mezní bezpečné hladiny VD Boskovice, která je na kótě 432,30 m n. m. Dále pomocí *stagnation pressure* byl nastaven stálý přítok vody do modelu, čímž bude dosaženo ustáleného stavu.

Při simulaci proudění ve Flow-3D byly uvažovány tyto zjednodušující předpoklady:

- proudění nestlačitelné kapaliny,
- zanedbání provzdušnění proudu,
- ustálené proudění,
- izotermický děj.

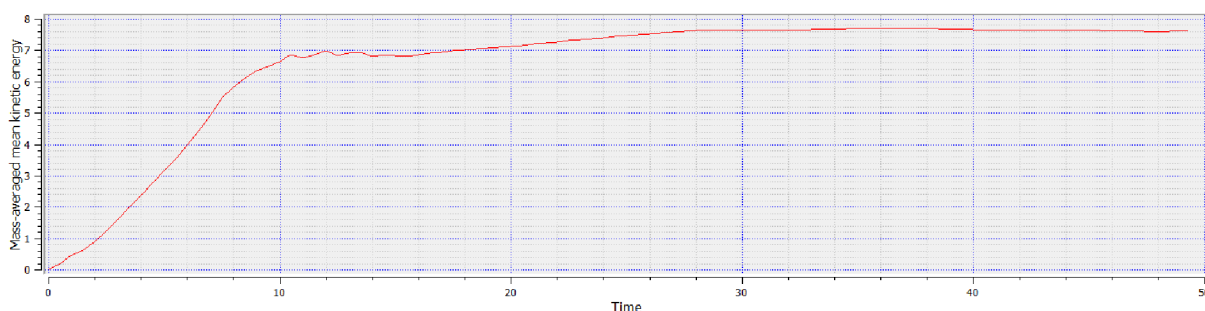
F. Výsledky numerického modelování

Po mnoha hodinách výpočtů sloužících k analýze volby jednak vhodné velikosti buněk výpočetní sítě a jednak k volbě vhodné drsnosti povrchu modelu, byly vypočítány **tři hlavní numerické modely proudění**:

- První i druhý numerický model proudění měl nastavenou počáteční podmínku úrovně hladiny na hodnotu, která odpovídala mezní bezpečné hladině VD Boskovice, a to na hodnotu 432,30 m n. m. Nicméně u prvního numerického modelu bylo nastaveno turbulentní proudění řešené pomocí RNG $k-\varepsilon$ modelu, který byl následně porovnán s Hydraulickým modelovým výzkumem bezpečnostního objektu VD Boskovice [7], zatímco u druhého numerického modelu proudění byl nastaven model laminární.
- Třetí numerický model proudění měl zvolenu počáteční podmínku takové úrovně hladiny, při které by teoreticky došlo k převedení kontrolní povodňové vlny KPV_{10 000} s kulminačním průtokem $Q_{10\,000} = 186,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Doba výpočtu prvního, turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu byla přibližně 100 hodin a měla velikost téměř 72 GB, zatímco doba výpočtu druhého, laminárního numerického modelu trvala cca 50 hodin a měla velikost přibližně 36 GB. Doba výpočtu třetího, turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu byla cca 140 hodin.

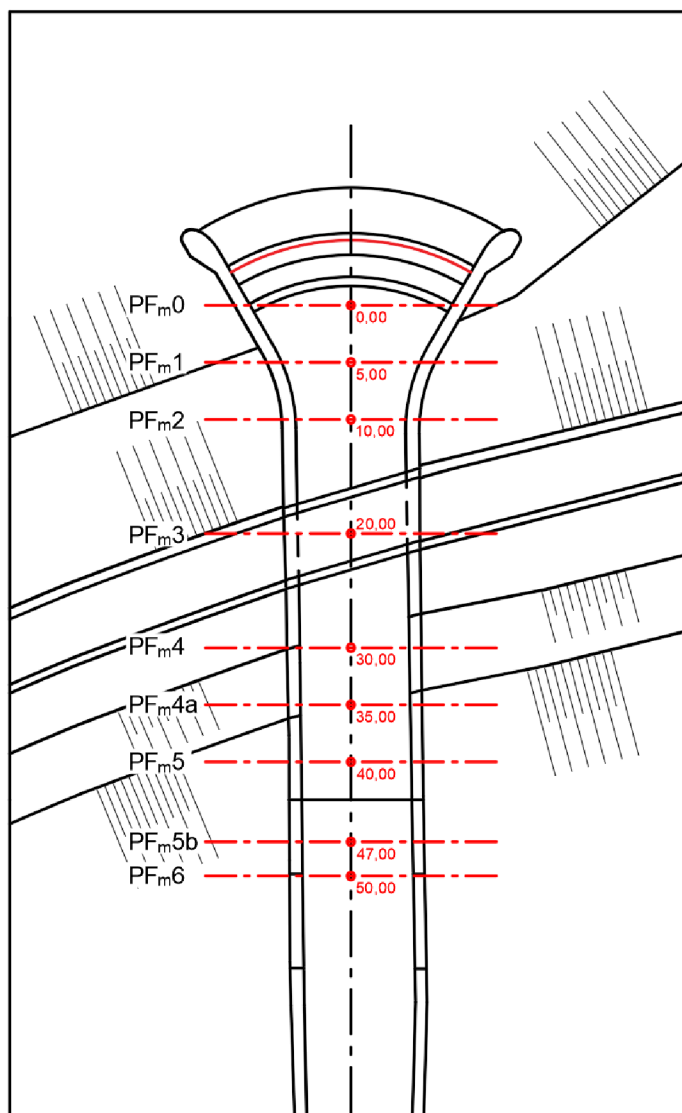
Pomocí grafu objemu tekutiny (Volume of fluid 1) a grafu průměrné kinetické energie (mass averaged mean kinetic energy), který je zobrazen na obrázku 41, je patrné, že v případě turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu s hladinou na kótě 432,30 m n. m. došlo přibližně v 49 sekundě simulace k ustálenému stavu a bylo tedy možné to považovat za ustálené řešení. U dalších numerických modelů byl průběh velice podobný.



Obrázek 41: Graf průměrné kinetické energie

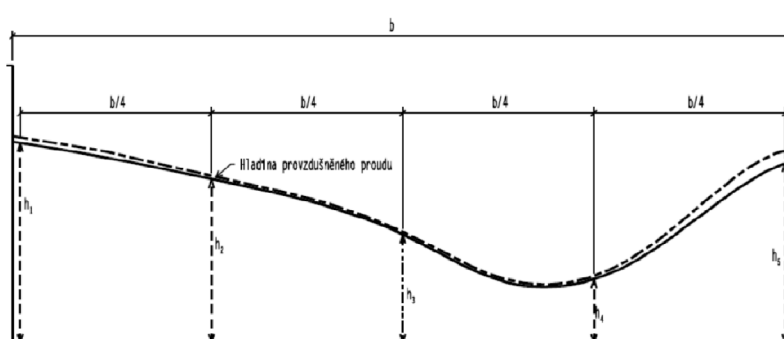
F.1.1 Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu a fyzikálního modelu

Numerický model proudění s nastaveným turbulentním prouděním, který byl řešený pomocí RNG $k-\varepsilon$ modelu s hladinou na kótě **432,30 m n. m.**, byl porovnán s fyzikálním modelem Hydraulického modelového výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7]. Fyzikální model měl při stejné hladině průtok $Q = 167,00 \text{ m}^3/\text{s}$, zatímco u numerického modelování proudění ve Flow-3D byl průtok $Q = 173,49 \text{ m}^3/\text{s}$. Tento drobný rozdíl může být způsobený ze strany fyzikálního modelu při jehož zhotovení mohlo dojít k chybě v geometrii modelu nebo chybou přístroje při určování přepadové výšky nebo hodnot průtoků. Rozdíl může být také způsobený chybou v geometrii vytvořeného virtuálního 3D modelu. Dále použitím velikosti buněk výpočetní sítě, drsností, zanedbáním provzdušnění proudu a nejistotou danou numerickou metodou a vlivem zjednodušení 3D modelu. K porovnání numerického modelování proudění ve Flow-3D s hydraulickým modelovým výzkumem byly použity hodnoty, které byly při hydraulickém modelovém výzkumu změřeny při přepadové výšce 2,32 m. Rozdíl 2 cm byl po přepočtu na fyzikální model asi 1 mm a mohl být tedy způsobený například možnou chybou přístroje, vznikem vln při přepadání vody přes přeliv nebo chybou při vytváření modelu. Pro porovnání hloubky a střední rychlosti proudu bylo použito stejné označení, umístění a staničení měrných profilů jako u Hydraulického modelového výzkumu [7]. Umístění měrných profilů společně s jejich označením a staničením v metrech je zobrazeno na obrázku 42.



Obrázek 42: Půdorys modelu s měrnými profily

Rovněž i hloubky proudu v příčném profilu byly měřeny ve stejných místech jako u Hydraulického modelového výzkumu [7], a to podle obrázku 43.



Obrázek 43: Schéma rozmístění měrných kolmic v profilech spadiště a skluzu modelu [7]

V tabulce 14 jsou uvedeny hloubky a střední rychlosti proudu v jednotlivých měrných profilech a rozdíl těchto hodnot mezi turbulentním numerickým modelem ve Flow-3D

a fyzikálním modelem. V tabulce h_i označuje hloubku proudu podle obrázku 43 a v střední rychlost proudu. Pro větší přehlednost bylo použito podbarvení hodnot, kdy modré podbarvení značí hodnoty z Hydraulického modelového výzkumu [7] a zelené podbarvení značí hodnoty z numerického modelování proudění v softwaru Flow-3D.

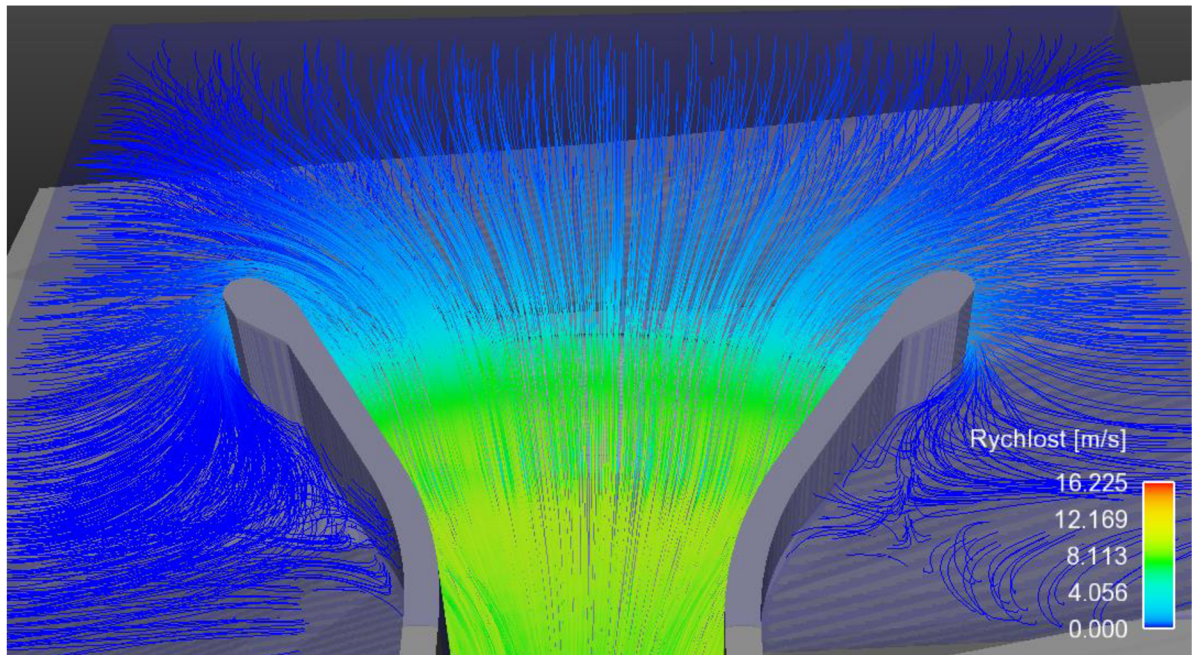
Tabulka 14: Porovnání num. modelu ve Flow-3D a fyzikálního modelu [7]

Ozn. měrného profilu na modelu – PF _m	i	0	1	2	3	4	4a	5	5b	6
Staničení	[m]	0	5	10	20	30	35	40	47	50
h_1 – fyz. model	[m]	1,40	1,80	0,80	2,60	2,30	1,60	1,80	3,20	2,20
h_2 – fyz. model	[m]	1,40	1,80	2,20	1,80	2,30	1,60	2,00	1,80	1,80
h_3 – fyz. model	[m]	1,50	2,00	3,40	1,90	2,20	3,40	2,20	1,70	1,40
h_4 – fyz. model	[m]	1,40	1,80	2,20	2,20	2,00	1,60	1,70	1,60	1,80
h_5 – fyz. model	[m]	1,30	1,40	1,00	3,20	1,80	1,60	1,50	2,40	3,00
h_1 – Flow-3D	[m]	1,04	1,37	1,02	2,72	1,97	1,94	2,27	2,19	1,73
h_2 – Flow-3D	[m]	1,31	1,82	2,40	1,90	2,08	2,04	2,16	1,90	1,84
h_3 – Flow-3D	[m]	1,30	1,84	2,88	1,90	2,37	3,17	1,91	1,68	1,88
h_4 – Flow-3D	[m]	1,31	1,82	2,40	1,90	2,08	2,04	2,16	1,90	1,84
h_5 – Flow-3D	[m]	0,93	1,37	0,93	2,90	1,94	1,69	1,94	2,11	2,00
Rozdíl h_1 – Flow-3D a fyz. modelu	[m]	0,36	0,43	0,22	0,12	0,33	0,34	0,47	1,01	0,47
Rozdíl h_2 – Flow-3D a fyz. modelu	[m]	0,09	0,02	0,20	0,10	0,22	0,44	0,16	0,10	0,04
Rozdíl h_3 – Flow-3D a fyz. modelu	[m]	0,20	0,16	0,52	0,00	0,17	0,23	0,29	0,02	0,48
Rozdíl h_4 – Flow-3D a fyz. modelu	[m]	0,09	0,02	0,20	0,30	0,08	0,44	0,46	0,30	0,04
Rozdíl h_5 – Flow-3D a fyz. modelu	[m]	0,37	0,03	0,07	0,30	0,14	0,09	0,44	0,29	1,00
v – fyz. model	[m/s]	6,87	7,97	9,15	7,59	8,39	9,02	9,54	8,2	8,47
v – Flow-3D	[m/s]	8,34	8,71	9,32	8,01	8,69	8,30	8,58	9,16	9,50
Rozdíl v – Flow-3D a fyz. modelu	[m/s]	1,47	0,74	0,17	0,42	0,30	0,72	0,96	0,96	1,03

Z předchozí tabulky je patrné, že hloubka proudu z numerického modelování proudění se v softwaru Flow-3D v některých oblastech liší od hloubky proudu z fyzikálního modelu řádově pouze o jednotky centimetrů. Nicméně v některých místech je tento rozdíl výraznější, a to řádově až o desítky centimetrů. U měrných profilu PF_{m5b} a PF_{m6} je rozdíl hloubky proudu až 1 m. Tyto rozdíly mohou být způsobeny chybami v geometrii fyzikálního modelu nebo v geometrii 3D modelu, numerickou chybou ve Flow-3D a mnoha dalšími faktory, z nichž některé již byly popsány výše.

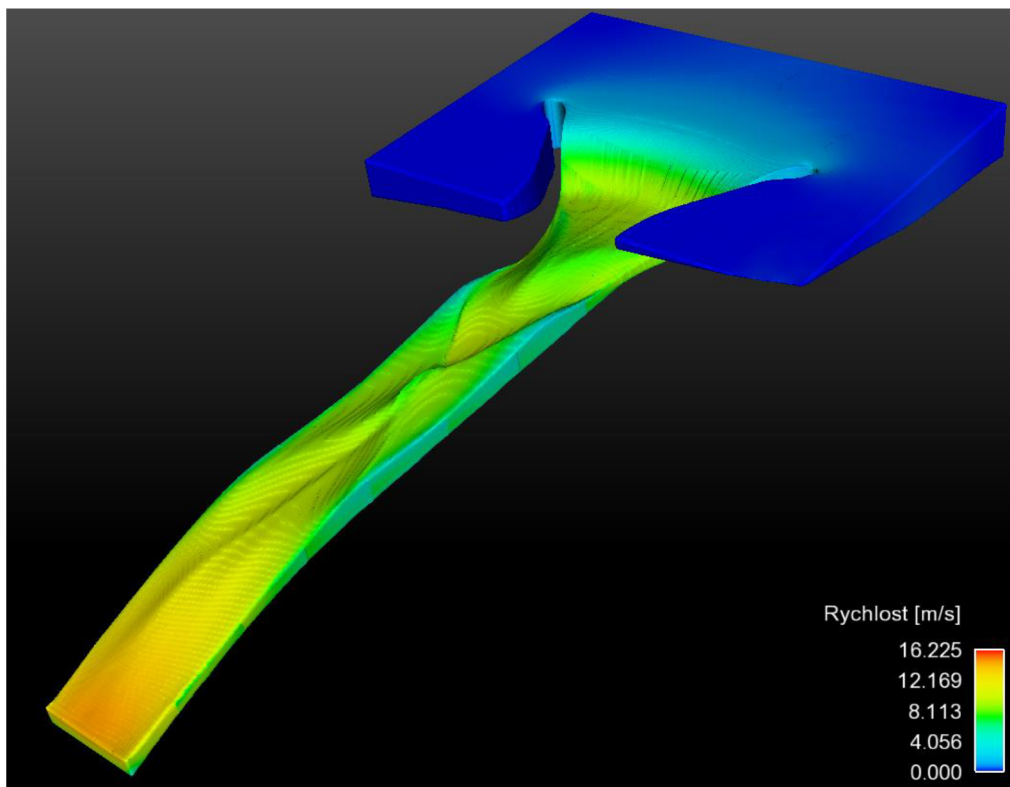
Jedním z dalších faktorů může být i velikost nátoky, který by bylo vhodné z pohledu geometrického uspořádání pilířů zvětšit, což by zvětšilo počet buněk a prodloužilo výpočet. Dále je také patrné z obrázku 44, že během proudění přes bezpečnostní přeliv ve Flow-3D

dochází k přítoku vody i v oblasti za oběma protiproudě předsunutými pilíři. Tento jev je patrnější ve směru po proudu za pravým pilířem. Jak již bylo uvedeno v kapitole E.1 Tvorba virtuálního 3D modelu, byl návodní svah při modelování virtuálního 3D modelu zjednodušen, takže skutečné proudění na VD může být mírně rozdílné. U fyzikálního modelu nebyl návodní svah ani dno nádrže za napojením kamenné dlažby na terén dna nádrže vytvořen a nebyl tak tento jev ve zprávě popsán, proto ho nelze úplně s numerickým modelem srovnat.

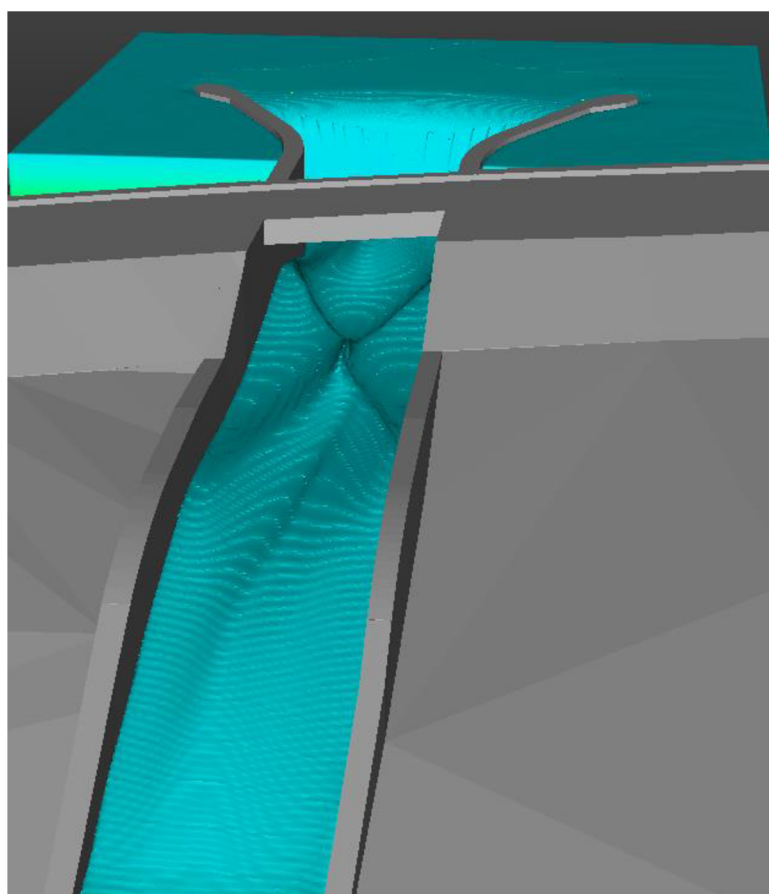


Obrázek 44: Barevné rozlišení proudnic dle rychlosti

Podle numerického modelování proudění ve Flow-3D dochází ve spadišti vlivem jeho zúžení a dále ke zúžení v místě přemostění skluzu k příčným vlnám. Během simulace proudění nedošlo k přestřikům vodní tříště nebo výstupu hladiny a přestřikům nad úroveň projektovaných bočních stěn, jak tomu bylo u fyzikálního modelu. Průběh hladiny je zobrazen na obrázku 45 a 46.

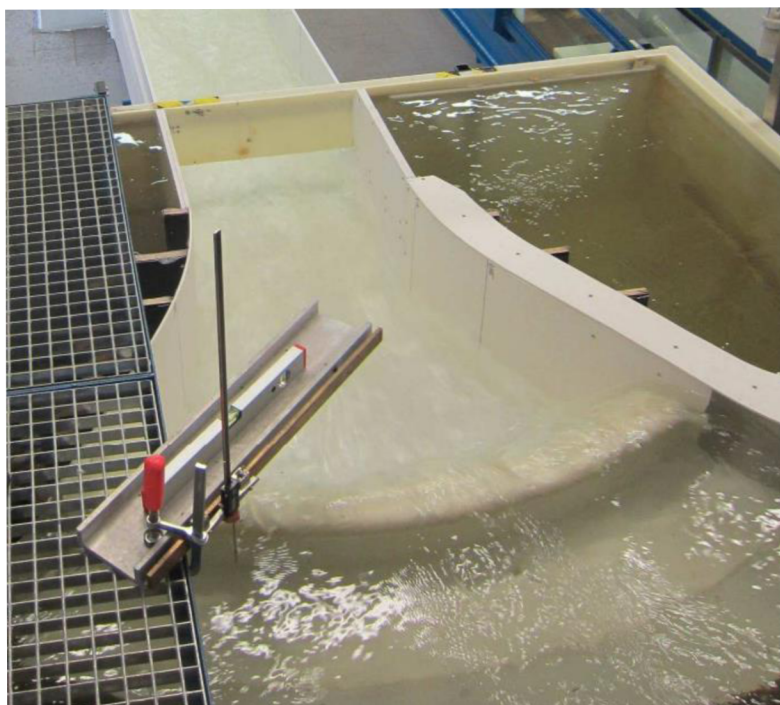


Obrázek 45: Průběh hladiny ve Flow-3D bez zobrazeného 3D modelu



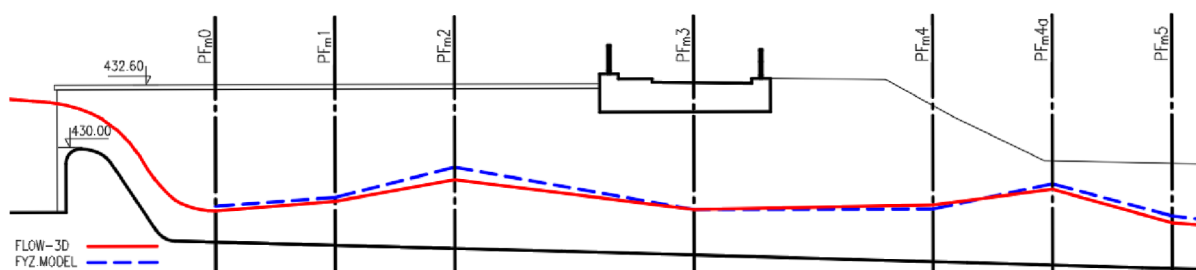
Obrázek 46: Průběh hladiny ve Flow-3D se zobrazeným 3D modelem

Na Obrázku 47 je zobrazen fyzikální model, bohužel s velice málo viditelnou hladinou.



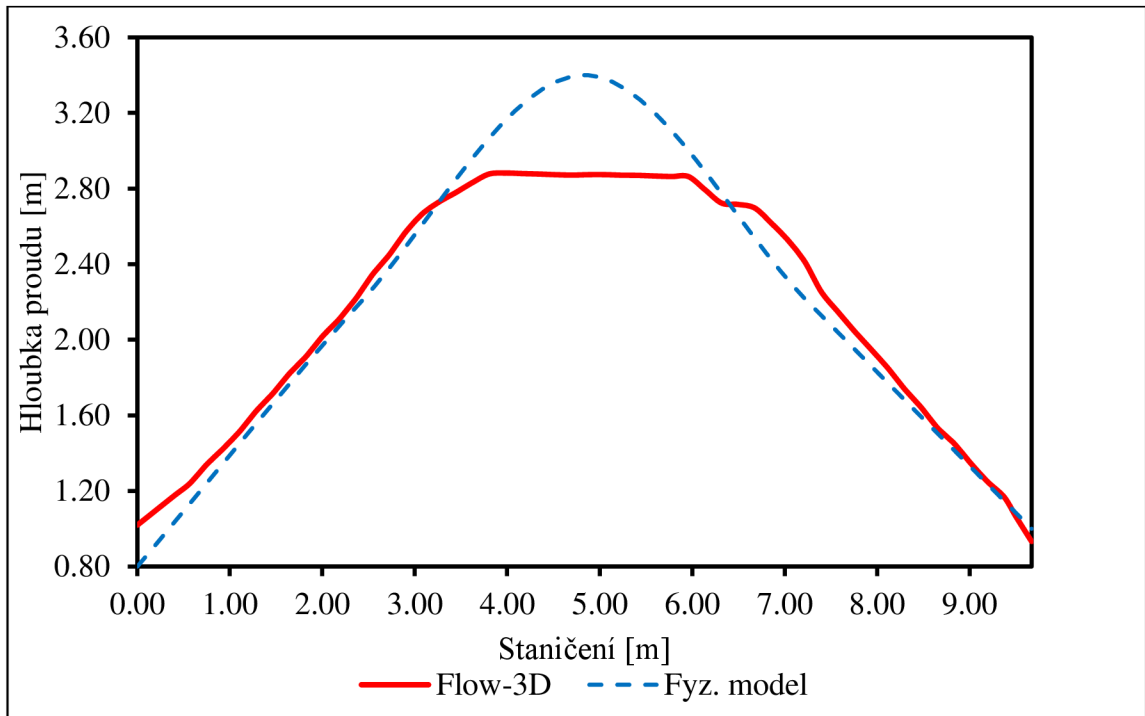
Obrázek 47: Průběh hladiny na fyzikálním modelu [22]

Na obrázku 48 je pro porovnání zobrazena hladina fyzikálního modelu a hladina ze softwaru Flow-3D na podélném řezu BP, spadiště a skluzu v rovině symetrie. Hloubky proudu jsou v těchto bodech měrných profilů velice podobné.

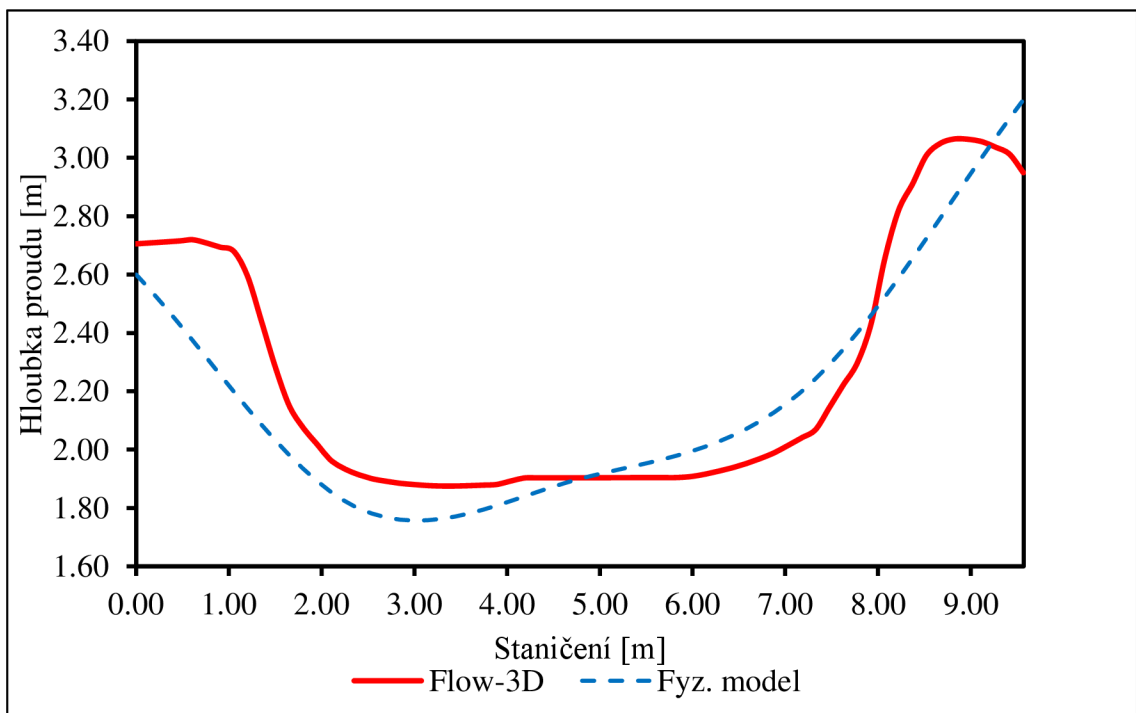


Obrázek 48: Porovnání hladin z Flow-3D s hladinou z fyzikálního modelu

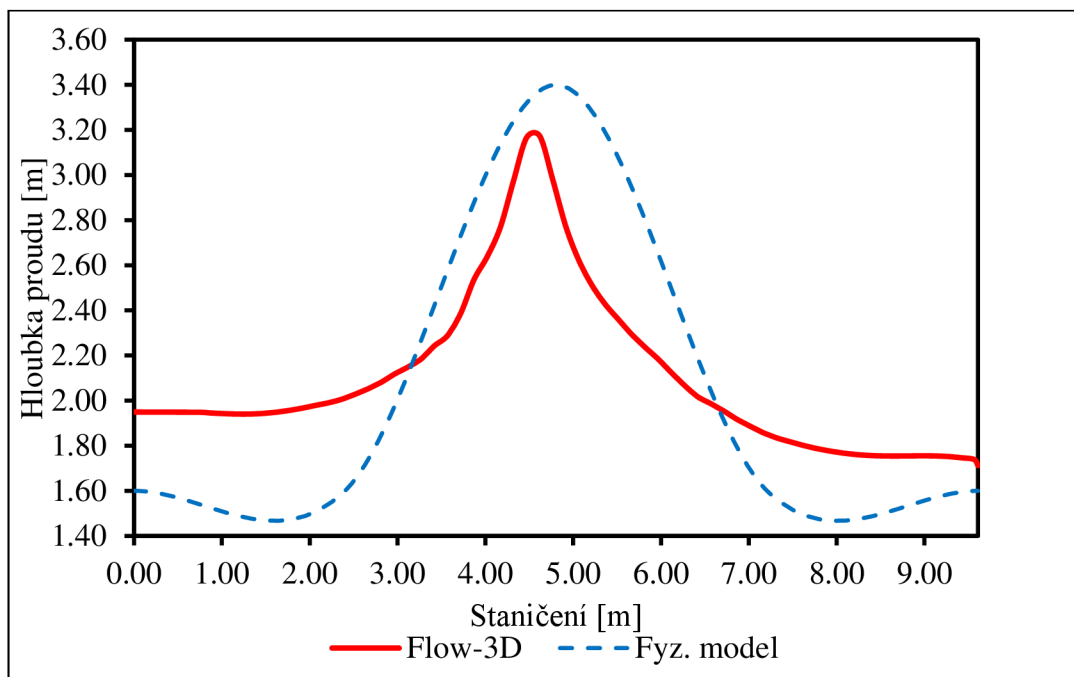
K vizuálnímu porovnání hloubky proudu jsou pro příklad na obrázku 49, 50 a 51 uvedeny průběhy hladin v měrných profilech PF_{m2} , PF_{m3} , PF_{m4a} , kde se software Flow-3D dokázal v určitých oblastech poměrně přesně přiblížit k hladině u fyzikálního modelu. Nicméně například u měrného profilu PF_{m4a} se průběh hladiny v softwaru Flow-3D hladině fyzikálního modelu příliš nepodobá. Důvody byly popsány výše.



Obrázek 49: Porovnání hladin v PF_{m2}

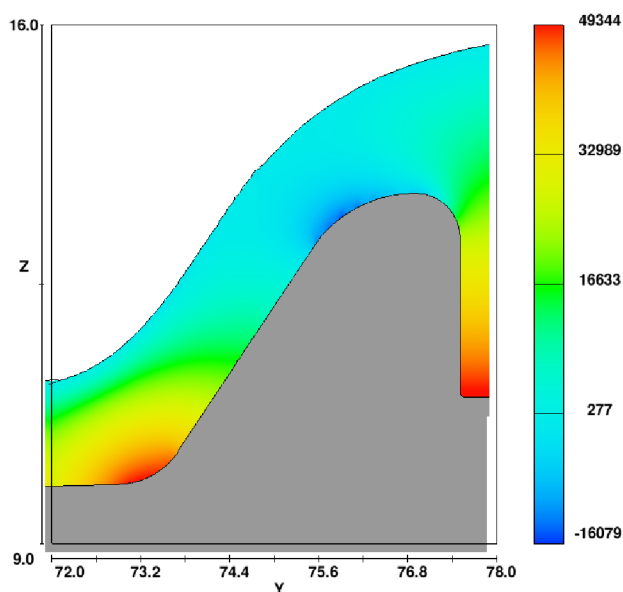


Obrázek 50: Porovnání hladin v PF_{m3}



Obrázek 51: Porovnání hladin v PF_{m4a}

Podle numerického modelu docházelo během proudění vody přes přeliv v oblasti přechodu proudnicové plochy na vzdušní líc přelivu se sklonem 3:2 k mírnému podtlaku, který byl cca 16 kPa, což přibližně odpovídá 1,6 m v. sl. Vzhledem k tomu, že proudnicová plocha je navržena jako beztlaková plocha a má přibližně tvar proudnicové přelivné plochy dle Scimemiho, mohl být tento mírný podtlak způsobený jednak tím, že přepadová výška byla větší než výška návrhová a dále také zjednodušením tvaru proudnicové plochy, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole. U fyzikálního modelu nebyl podtlak měřen, a proto jeho velikost s numerickým modelem nelze porovnat. Na obrázku 52 je zobrazen přeliv s izoliniemi tlaků a legendou s hodnotami v Pa.



Obrázek 52: Izolinie tlaků na přelivu při průtoku $Q = 173,49 \text{ m}^3/\text{s}$

F.1.2 Převedení kulminačního průtoku $KPV_{10\ 000}$

Podle numerického modelování proudění v softwaru Flow-3D by byl průtok $Q_{10\ 000} = 186,5\ \text{m}^3/\text{s}$ odpovídající kulminačnímu průtoku $KPV_{10\ 000}$ teoreticky dosažen při hladině na kótě 432,40 m n. m. tedy 10 cm nad úrovní MBH. Hloubky proudu ve spadišti a ve skluzu nejsou při tomto průtoku ve zprávě Hydraulického modelového výzkumu [7] uvedeny a nebyly tedy s numerickým modelem porovnány. Doba výpočtu numerického modelu byla přibližně 140 hodin.

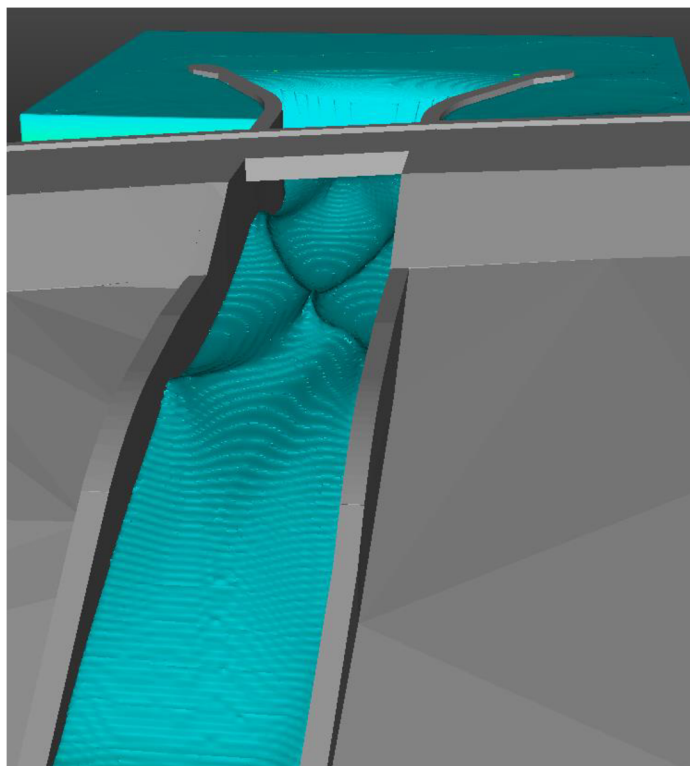
F.1.3 Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ a laminárního modelu

Byly také porovnány výpočty hloubky proudu ve Flow-3D mezi turbulentním RNG $k-\varepsilon$ model a laminárním modelem. Přestože jsou si hladiny vzájemně velice podobné a rozdíl je v některých místech pouze v jednotkách centimetrů, tak v případě turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu výpočet trval asi o 50 hodin déle, než v případě modelu laminárního. Hodnoty hloubek proudu v jednotlivých měrných profilech a rozdíl těchto hodnot mezi turbulentním a laminárním numerickým modelem jsou uvedeny v tabulce 15, kde h_i označuje hloubku proudu podle obrázku 43. Pro větší přehlednost bylo použito podbarvení hodnot, kdy šedé podbarvení značí hodnoty z laminárního modelu a zelené podbarvení značí hodnoty z turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu.

Tabulka 15: Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ a laminárního modelu

Ozn. měrného profilu na modelu – PF_m	i	0	1	2	3	4	4a	5	5b	6
Staničení	[m]	0	5	10	20	30	35	40	47	50
h_1 – laminární model	[m]	1,01	1,29	0,92	2,50	1,93	1,62	2,06	2,40	1,96
h_2 – laminární model	[m]	1,28	1,81	2,32	1,75	2,03	1,80	2,08	1,95	1,96
h_3 – laminární model	[m]	1,25	1,83	2,74	1,87	2,20	3,07	2,01	1,73	1,80
h_4 – laminární model	[m]	1,24	1,65	2,14	1,86	2,00	1,66	1,76	1,98	2,06
h_5 – laminární model	[m]	0,93	1,34	0,84	2,86	2,02	1,44	1,44	2,75	2,19
h_1 – turbulentní model	[m]	1,04	1,37	1,02	2,72	1,97	1,94	2,27	2,19	1,73
h_2 – turbulentní model	[m]	1,31	1,82	2,40	1,90	2,08	2,04	2,16	1,90	1,84
h_3 – turbulentní model	[m]	1,30	1,84	2,88	1,90	2,37	3,17	1,91	1,68	1,88
h_4 – turbulentní model	[m]	1,31	1,82	2,40	1,90	2,08	2,04	2,16	1,90	1,84
h_5 – turbulentní model	[m]	0,93	1,37	0,93	2,90	1,94	1,69	1,94	2,11	2,00
Rozdíl h_1 – turb. a lam. modelu	[m]	0,03	0,08	0,10	0,22	0,04	0,32	0,21	0,21	0,23
Rozdíl h_2 – turb. a lam. modelu	[m]	0,03	0,01	0,08	0,15	0,05	0,24	0,08	0,05	0,12
Rozdíl h_3 – turb. a lam. modelu	[m]	0,05	0,01	0,14	0,03	0,17	0,10	0,10	0,05	0,08
Rozdíl h_4 – turb. a lam. modelu	[m]	0,07	0,17	0,26	0,04	0,08	0,38	0,40	0,08	0,22
Rozdíl h_5 – turb. a lam. modelu	[m]	0,00	0,03	0,09	0,04	0,08	0,25	0,50	0,64	0,19

Na obrázku 53 je zobrazen průběh hladiny laminárního modelu v softwaru Flow-3D.



Obrázek 53: Průběh hladiny lam. modelu

G . Závěrečné zhodnocení

V této diplomové práci bylo simulováno proudění v plánovaném bezpečnostním přelivu vodního díla Boskovice v softwaru Flow-3D. Délka přelivné hrany plánovaného bezpečnostního přelivu je 21,99 m. Nicméně v rámci rekonstrukce VD Boskovice byla na základě závěru Hydraulického modelového výzkumu bezpečnostního objektu VD Boskovice [7], zvětšena na délku 24,60 m, a to z důvodu, že při mezní bezpečné hladině MBH (432,30 m n. m.) nedojde k bezpečnému převedení kontrolní povodňové vlny KPV_{10 000} s kulminačním průtokem $Q_{10\,000} = 186,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ale pouze průtokem $Q = 167,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Toto tvrzení se pomocí numerického modelování proudění s použitím turbulentního RNG $k-\varepsilon$ modelu ve Flow-3D potvrdilo a uvádělo při MBH průtok $173,49 \text{ m}^3/\text{s}$. Rozdíl mezi Hydraulickým modelovým výzkumem [7] a numerickým modelováním proudění ve Flow-3D byl tedy přibližně 3,7 %, což mohlo být způsobeno mnoha různými faktory, a to například možnou chybou v geometrii fyzikálního modelu nebo v geometrii vytvořeného virtuálního 3D modelu. Dále také možnou chybou v průběhu měření na fyzikálním modelu například chybou přístroje při určování přepadové výšky nebo hodnot průtoků. U numerického modelu může být rozdíl způsoben použitou velikostí buněk výpočetní sítě, drsností, zanedbáním provzdušnění proudu a nejistotou danou numerickou metodou nebo vlivem zjednodušení 3D modelu. Tyto uvedené faktory mohou ovlivnit i průběh hladiny simulované hladiny v softwaru Flow-3D, která se v některých oblastech liší od hloubky proudu z Hydraulického modelového výzkumu [7] řádově pouze o jednotky centimetrů. Nicméně v některých oblastech je tento rozdíl výraznější, a to řádově až o desítky centimetrů, výjimečně i o 1 m. Podle Hydraulického modelového výzkumu [7] docházelo během simulace proudění na fyzikálním modelu k občasným přestřikům vodní tříště a občasnému výstupu hladiny a přestřikům nad úroveň projektovaných bočních stěn, k čemuž u simulace proudění v softwaru Flow-3D nedocházelo. K převedení kontrolní povodňové vlny KPV_{10 000} s kulminačním průtokem $Q_{10\,000} = 186,5 \text{ m}^3/\text{s}$ přes bezpečnostní přeliv by podle numerického modelování proudění ve Flow-3D došlo až při hladině v nádrži na kótě 432,40 m n. m. tedy 10 cm nad úrovní MBH. Tento výpočet byl proveden pro šířku přelivné hrany 21,99 m, avšak šířka již zrekonstruovaného bezpečnostního přelivu VD Boskovice je 24,60 m.

Z předchozího zhodnocení je zřejmé, že není prozatím zcela spolehlivé použití pouze numerického modelování na vytvořeném virtuálním 3D modelu bez jakékoliv citlivostní analýzy a následného porovnání s hydraulickým výzkumem na fyzikálním modelu. Nicméně v průběhu několika následujících let může v případě dostatečné spolehlivosti výsledků

numerického modelování proudění bez nutnosti posouzení s fyzikálním modelem, vést k postupnému nahrazení finančně nákladnějších hydraulických modelových výzkumů prováděných v laboratoři.

H. Použité podklady

- [1] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: Modul 01*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [2] BOOR, B., J. KUNŠTÁTSKÝ a C. PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968. ISBN 04-710-68.
- [3] STARA, Vlastimil a Helena KOUTKOVÁ. 3. *Vodohospodářská konference s mezinárodní účastí: Součinitel přepadu přelivu s kruhově zaoblenou korunou z fyzikálních experimentů*. Brno, 2003. ISBN 80-86433-26-9.
- [4] ŘÍHA, Jaromír. *Hydrotechnické stavby II: Modul 01 Přehrady*. Studijní opora. FAST VUT v Brně 2006.
- [5] JANDORA, Jan. *Matematické modelování ve vodním hospodářství*. VUT v Brně, 2008.
- [6] KRÍŽ, Tomáš. *Manipulační řád pro vodní dílo Boskovice na toku Bělá v km 7,400*. Brno, 2020.
- [7] ŠULC, Jan a Michal ŽOUŽELA. *Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Boskovice na ÚVS Stavební fakulty VUT v Brně. Výzkumná zpráva, LVV-ÚVS-FAST VUT v Brně, 2013*
- [8] Autodesk® AutoCAD® 2020 [Počítačový software]. (2019). <https://www.autodesk.cz/>
- [9] Blender v2.90 [Počítačový software]. (2020). <https://www.blender.org/>
- [10] FLOW-3D® verze 11.0.4 [Počítačový software]. (2015). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>
- [11] Why FLOW-3D? *Flow-3D* [online]. [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://www.flow3d.com/products/flow-3d/why-flow-3d/>
- [12] Podklady poskytnuté Ing. Petrem Holomkem (Povodí Moravy, s. p.)
- [13] CHANSON, H. a J.S. MONTES. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering: Overflow Characteristics of Circular Weirs: Effects of Inflow Conditions*. 3. Reston: The American Society of Civil Engineers, 1998. ISBN 0733-9437.
- [14] KRATOCHVÍL, Jiří, Miloš JANDA a Vlastimil STARA. *Projektování přehrad: Komplexní projekt HT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988.
- [15] STUDNIČKA, Tomáš. *Matematické modelování odlehčovacích komor na stokových sítích*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Prax, Ph.D.
- [16] ŘÍHA, Jaromír. *Hydraulika podzemních vod: Modul 01*. Studijní opora. FAST VUT v Brně 2006.

- [17] ArcMap Desktop 10.5 Version: 10.5.0.6491, [Počítačový software]. (2016). Copyright © 1995-2016 Esri
- [18] VD Boskovice. *Povodí Moravy* [online]. Media Age Digital, s.r.o., 2010-2020. [cit. 2020-09-08]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/boskovice/>.
- [19] DESATOVÁ, Martina. *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu vybraného vodního díla*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
- [20] HOLINKA, Matouš. *Numerické modelování proudění v bezpečnostním objektu vodního díla*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
- [21] KŘIVOHLÁVEK, Roman. *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
- [22] ŠULC, Jan, *Podklady k přednáškám předmětu CR053 Bezpečnostní objekty hydrotechnických staveb*. Brno, 2020.
- [23] HOLEČEK, Miroslav. *Hydraulika přelivu sypaných přehrad*. Praha, 2006. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky.
- [24] Místní šetření dne 17. 12. 2020 za účasti Bc. Jiří Svoboda a Milan Coufal (Povodí Moravy, s. p.).
- [25] JANDORA, Jan, *Podklady k přednáškám předmětu CR005 Matematické modelování ve vodním hospodářství*. Brno, 2020.
- [26] KOZUBKOVÁ, Milada, *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX*. Vysoká škola Báňská Technická univerzita Ostrava, 2008.

I. Seznam tabulek

Tabulka 1: Bezpečnostní přelivy tuzemských přehrad [23]	6
Tabulka 2: Koeficienty $k-\varepsilon$ modelu [5].....	25
Tabulka 3: Parametry jednotlivých částí VD Boskovice dle [6]	30
Tabulka 4: Základní technické parametry bezpečnostního přelivu VD Boskovice [6].....	33
Tabulka 5: Základní technické parametry skluzu a vývaru dle [6]	34
Tabulka 6: Hydrologické poměry [6]	35
Tabulka 7: Číselné charakteristiky m-denních průtoků dle [6]	35
Tabulka 8: Číselné charakteristiky N-letých průtoků dle [6]	35
Tabulka 9: Číselné charakteristiky objemů N-letých teoretických PV dle [6].....	36
Tabulka 10: Porovnání průtoků na zjednodušeném modelu BP s hydr. výpočtem	49
Tabulka 11: Citlivostní analýza vlivu drsnosti na průtok	50
Tabulka 12: Parametry jednotlivých mesh blocků	51
Tabulka 13: Okrajové podmínky jednotlivých mesh blocků	51
Tabulka 14: Porovnání num. modelu ve Flow-3D a fyzikálního modelu [7].....	56
Tabulka 15: Porovnání turbulentního RNG $k-\varepsilon$ a laminárního modelu.....	62

J. Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní typ ostrohranného přelivu (Bazinův přeliv) [1]	3
Obrázek 2: Příklady tvarů příčných profilů jezových nebo přehradních přelivů [1].....	4
Obrázek 3: Přeliv se širokou korunou [1].....	4
Obrázek 4: Schématický podélný řez šachtovým přelivem [14].....	5
Obrázek 5: Přepad přes přeliv obecného průřezu [1]	8
Obrázek 6: Nedokonalý přepad [1]	9
Obrázek 7: Typy přelivů podle půdorysného uspořádání [1].....	10
Obrázek 8: Boční kontrakce a součinitel bočního zúžení u pilířů [1]	11
Obrázek 9: Schématické porovnání beztlakové proudnicové plochy s tlakovou a podtlakovou plochou [22].....	11
Obrázek 10: Spojitost proudu v elementárním hranolu ve směru osy y [5].....	16
Obrázek 11: Složky napětí působící na stěny rovnoběžné s rovinou xz [5].....	18
Obrázek 12: Kolísání rychlosti při turbulentním proudění [5].....	22
Obrázek 13: Pravoúhlá síť s označením uzlů [16]	26
Obrázek 14: Situace vnějších vztahů VD Boskovice [17]	28
Obrázek 15: Vzdušní svah VD Boskovice [24].....	30
Obrázek 16: Návodní svah VD Boskovice [24]	31
Obrázek 17: Odběrná věž VD Boskovice [24].....	32
Obrázek 18: Kašnový čelní bezpečnostní přeliv [24].....	33
Obrázek 19: Skluz bezpečnostního objektu VD Boskovice [24]	34
Obrázek 20: Skluz a divergentní vývar bezpečnostního objektu VD Boskovice [24]	35
Obrázek 21: Pravděpodobný průběh teoretické PV _{10 000} na Bělé v profilu hráze VD Boskovice [6]	36
Obrázek 22: Půdorys bezpečnostního přelivu a části skluzu VD Boskovice [12]	37
Obrázek 23: Podélný řez BP a spadiště v rovině symetrie [12]	38
Obrázek 24: Upravený půdorys přelivu a skluzu VD Boskovice pro tvorbu 3D modelu	39
Obrázek 25: Vytvořená konstrukce přelivu bez úpravy	40
Obrázek 26: Vytvořená konstrukce přelivu po úpravě.....	40
Obrázek 27: Detail upraveného tvaru přelivu	41
Obrázek 28: Detail přelivu na virtuálním 3D modelu	41
Obrázek 29: Původní podoba napojení kamenné dlažby na dno nádrže [12]	42
Obrázek 30: Upravená podoba napojení kamenné dlažby na dno nádrže.....	42
Obrázek 31: Podoba přelivu s původním nastavením vyhlazení.....	43
Obrázek 32: Podoba přelivu s maximálním vyhlazením.....	43
Obrázek 33: 3D model s modře znázorněnými normálami	44

Obrázek 34: Zpráva kontroly nástroje qAdmesh.....	45
Obrázek 35: Nastavení časového kroku	46
Obrázek 36: Zkontrolovaný a opravený model vložený do Flow-3D	47
Obrázek 37: Nevhodně zvolená velikost mesh blocku.....	47
Obrázek 38: Přeliv zobrazený metodou FAVOR™ při velikosti buňky 0,5 m.....	48
Obrázek 39: Zjednodušený model BP	49
Obrázek 40: Mesh blocky se zobrazenými okrajovými podmínkami	51
Obrázek 41: Graf průměrné kinetické energie	53
Obrázek 42: Půdorys modelu s měrnými profily.....	55
Obrázek 43: Schéma rozmístění měrných kolmic v profilech spadiště a skluzu modelu [7]...55	55
Obrázek 44: Barevné rozlišení proudnic dle rychlosti	57
Obrázek 45: Průběh hladiny ve Flow-3D bez zobrazeného 3D modelu	58
Obrázek 46: Průběh hladiny ve Flow-3D se zobrazeným 3D modelem	58
Obrázek 47: Průběh hladiny na fyzikálním modelu [22]	59
Obrázek 48: Porovnání hladin z Flow-3D s hladinou z fyzikálního modelu	59
Obrázek 49: Porovnání hladin v PF _{m2}	60
Obrázek 50: Porovnání hladin v PF _{m3}	60
Obrázek 51: Porovnání hladin v PF _{m4a}	61
Obrázek 52: Izolinie tlaků na přelivu při průtoku $Q = 173,49 \text{ m}^3/\text{s}$	61
Obrázek 53: Průběh hladiny lam. modelu	63

K . Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam symbolů:

h	přepadová výška	[m]
t	tloušťka přelivné hrany	[m]
Q	průtok	[m ³ /s]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
μ	součinitel přepadu	[-]
α	Coriolisovo číslo	[-]
v_0	přítoková rychlost	[m/s]
m	součinitel přepadu	[-]
b	celková šířka přelivné hrany	[m]
b_0	účinná šířka přelivné hrany	[m]
σ_z	součinitel zatopení	[-]
σ_s	součinitel šikmosti	[-]
h_0	energetická přepadová výška	[m]
h_d	hloubka dolní vody	[m]
d	zahloubení vývaru	[m]
H	rozdíl horní a dolní hladiny	[m]
s	výška přelivné hrany nad dolním dnem	[m]
s_1	výška přelivné hrany nad horním dnem	[m]
h_z	výška zatopení	[m]
n	počet zúžení	[-]
ζ	součinitel boční kontrakce	[-]
h_n	návrhová přepadová výška	[m]
r	poloměr přepadové hrany	[m]
ρ	hustota kapaliny	[kg/m ³]

HW	energetická přepadová výška	[m]
R	poloměr přepadové hrany	[m]
C_D	discharge coefficient	[-]
H_l	energetická výška nad horním dnem	[m]
D	výška přelivné hrany nad horním dnem	[m]
q_w	specifický průtok	[m ² /s]
v_i	složka vektoru rychlosti	[m/s]
t	čas	[s]
F_i	složka vektoru síly	[N]
m	hmotnost	[kg]
F_{bi}	složka vektoru síly objemového zatížení	[N]
F_{si}	složka vektoru síly povrchového zatížení	[N]
f_i	složka vektoru objemového zatížení vztaženého na jednotku hmotnosti	[m/s ²]
σ_{ij}	tenzor napětí	[Pa]
p	tlak	[Pa]
δ_{ij}	Kroneckerovo delta	[-]
λ	součinitel rychlosti objemového přetvoření	[Pa.s]
T	teplota	[K]
$\dot{\epsilon}_v$	rychlost objemového přetvoření	[1/s]
μ	součinitel dynamické viskozity	[Pa.s]
$\dot{\epsilon}_{ij}$	tenzor rychlosti přetvoření	[1/s]
τ_{ij}^f	tenzor viskózního napětí	[Pa]
\bar{v}_i	střední hodnota složky vektoru rychlosti	[m/s]
v'_i	flukтуаční složka vektoru rychlosti	[m/s]
\bar{p}	střední hodnota tlaku	[Pa]

p'	flukтуаční složka tlaku	[Pa]
τ_{ij}^t	tenzor Reynoldsových napětí	[Pa]
k	kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti	[J/kg]
ε	disipace kinetické energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti	[J/kg/s]
μ_t	součinitel turbulentní viskozity	[Pa.s]
$c_\mu, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}$	koeficienty k - ε modelu	[-]
\hat{L}	turbulentní délkové měřítko	[m]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	koeficienty k - ε modelu	[-]
$c'_{\mu}, c'_{\varepsilon 1}, c'_{\varepsilon 2}$	koeficienty RNG k - ε modelu	[-]
α, β	koeficienty RNG k - ε modelu	[-]
P	produkce turbulence	[-]
ω	rychlost disipace energie k jednotce objemu a času	[J/m ³ /s]
V_s	objem prostoru stálého nadržení	[m ³]
V_z	objem zásobního prostoru	[m ³]
V_{rn}	objem retenčního neovladatelného prostoru	[m ³]
V_c	objem celkového prostoru	[m ³]
M_s	hladina stálého nadržení	[m n. m.]
M_z	hladina zásobního prostoru	[m n. m.]
M_{rn}	hladina neovladatelného retenčního prostoru	[m n. m.]
M_{max}	maximální hladina	[m n. m.]
Q_m	m -denní průtok	[m ³ /s]
Q_N	N -letý průtok	[m ³ /s]
W_N	objem N -leté povodňové vlny	[m ³]

Seznam zkratk:

VD	Vodní dílo
BP	Bezpečnostní přeliv
KPV	Kontrolní povodňová vlna
PV	Povodňová vlna
NPV	Návrhová povodňová vlna
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large-Eddy Simulation
RNG	Renormalization group
DN	Jmenovitá světlost
2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
CAD	Computer-Aided Design
BPV	Balt po vyrovnání
MBH	Mezní bezpečná hladina
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
FAVOR	Fractional Area Volume Obstacle Representation
VOF	Volume of Fluid
CFD	Computational Fluid Dynamics