



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra hydrauliky a hydrologie**

Hydraulická studie rozdělovacího objektu na Úpě v Ratibořicích

Hydraulic study of water divider on the river Úpa in Ratibořice

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Vilém Ernest

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Ernest	Jméno: Vilém	Osobní číslo: 410682
Zadávací katedra: 11141 - Katedra hydrauliky a hydrologie		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Hydraulická studie rozdělovacího objektu na Úpě v Ratibořicích

Název diplomové práce anglicky: Hydraulic study of water divider on the river Úpa in Ratibořice



Pokyny pro vypracování:
Posouzení hydraulické funkce rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích. Uvedeným objektem se převádí část povodňových průtoků do VD Rozkoš. Výpočet průběhu hladin bude proveden pomocí matematického modelu Hec -Ras v.5 a to způsobem, kdy bude proudění v korytech s objekty řešeno pomocí 1D přístupu a v navazujícím inundačním území pomocí 2D přístupu. Výsledky porovnejte s výstupy vlastní bakalářské práce, kdy byl obdobný výpočet proveden pomocí matematického modelu FESWMS.

Seznam doporučené literatury:
HEC-RAS, River Analysis system: 2D Modeling User Manual. February 2016, Davis, USA.

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.


Datum zadání diplomové práce: 4. 10. 2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7. 1. 2018

Údaj uveďte v s... něho ak. roku

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

4.10.17 

Datum převzetí zadání

Prohlášení

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

.....

Místo, datum

.....

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc., za odborné rady při konzultacích.

Anotace

Diplomová práce se zabývá hydraulickou studií funkce rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích. Práce popisuje výpočet průběhu hladin pomocí matematického modelu v programu HEC-RAS, kde je kombinován jednorozměrný a dvourozměrný přístup matematického modelování. Součástí práce je i porovnání výsledků s výsledky bakalářské práce s názvem Hydraulická studie rozdělovacího objektu na Úpě v Ratibořicích, ve které byl proveden výpočet dvourozměrného matematického modelu stejného objektu v programu SMS s modulem FESWMS.

Annotation

This thesis deals with hydraulic study of function of water divider on the river Úpa in Ratibořice. The thesis describes computation of water levels using HEC-RAS mathematical model that is using combination of one-dimensional and two-dimensional mathematical modeling approach. The comparison of these results with the results of bachelor thesis Hydraulic study of water divider on the river Úpa in Ratibořice that is using SMS software with modul FESWMS based on two-dimensional mathematical modeling is also part of this thesis.

Klíčová slova

Hydraulika otevřených koryt, jednorozměrné a dvourozměrné matematické modelování proudění vody, HEC-RAS River Analysis System, neustálené proudění, rozdělovací objekt, vodní nádrž, Manningův součinitel drsnosti

Keywords

River hydraulics, one-dimensional and two-dimensional mathematical modeling of water flow, HEC-RAS River Analysis System, unsteady flow, water divider, reservoir, Manning's roughness coefficient

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	POPIS MODELOVANÉHO ÚZEMÍ	5
2.1	Vodní dílo Rozkoš	5
2.1.1	Obecné údaje	5
2.1.2	Ochranná funkce vodní nádrže Rozkoš	7
2.1.3	Popis rozdělovacího objektu ve Zlíči	10
2.1.4	Úpský přivaděč	15
2.2	Modelovaná oblast	16
3	PŘEHLED PROBLEMATIKY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY	18
3.1	Historie matematického modelování	18
3.1.1	První prvky hydroinformatiky	18
3.1.2	Pojem hydroinformatika	19
3.2	Typy matematických modelů	20
3.2.1	Bezrozměrné matematické modely	20
3.2.2	Jednorozměrné matematické modely	20
3.2.3	Dvourozměrné matematické modely	20
3.2.4	Trojrozměrné matematické modely	21
3.3	Stavba matematického modelu	21
3.3.1	Základní cíle	22
3.3.2	Základní řídicí rovnice	22
3.3.3	Schematizace	22
3.3.4	Metody řešení řídicích rovnic	22
3.3.5	Verifikace a kalibrace modelu	22
4	VÝPOČETNÍ PROGRAM HEC-RAS	24
4.1	HEC-RAS	24

4.2	Jednorozměrné neustálené proudění v programu HEC-RAS	24
4.2.1	Základní předpoklady	24
4.2.2	Hydraulické rovnice	25
4.3	Dvourozměrné proudění v programu HEC-RAS.....	31
4.3.1	Základní předpoklady	31
4.3.2	Hydraulické rovnice	31
5	VYTVOŘENÍ MODELU	34
5.1	Postup při tvoření modelu v programu HEC-RAS	34
5.2	Geodetické podklady	35
5.3	Výpočetní síť	36
5.3.1	Parametry výpočetní sítě v programu HEC-RAS.....	36
	Parametry výpočetní sítě v programu SMS.....	37
5.3.2	Určení odporu povrchu.....	38
5.4	Počáteční a okrajové podmínky	41
5.4.1	1D/2D model	41
5.5	Verifikace modelu.....	42
5.6	Prezentace výsledků.....	43
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	44
6.1	Varianta I.	45
6.2	Varianta II.	48
6.3	Varianta III.....	51
7	POROVNÁNÍ VÝSLEDKU S VÝSLEDKY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	53
7.1	Uživatelský dojem	53
7.2	Porovnání výsledků.....	53
7.2.1	Varianta I.	54
7.2.2	Varianta II.....	55
7.2.3	Varianta III.	55

8	ZÁVĚR.....	56
9	LITERATURA.....	58
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	59
11	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
12	SEZNAM TABULEK.....	62
13	SEZNAM SYMBOLŮ.....	63

1 ÚVOD

Zadáním diplomové práce je navázat na závěry bakalářské práce. V bakalářské práci s názvem *Hydraulická studie rozdělovacího objektu na Úpě v Ratibořicích* jsem se zabýval matematickým modelováním proudění vody stejným objektem. Výpočet, při kterém byl použit počítačový software SMS s modulem FESWMS, byl založen výhradně na dvourozměrném matematickém modelování proudění vody v ustáleném stavu. Výsledkem bakalářské práce bylo vyhodnocení rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu. Výpočty bylo ověřeno, že nedochází k rozdělení povodňového průtoku do jeho jednotlivých částí podle návrhů.

Cílem diplomové práce je vytvoření matematického modelu v programu HEC-RAS, který bude kombinovat jednorozměrný a dvourozměrný přístup matematického modelování. Po sestavení bude model porovnán s předchozím modelem vytvořeným v programu SMS a budou shrnuty výhody a nevýhody jednotlivých přístupů řešení.

Rozdělovací objekt na řece Úpě se nachází v národní přírodní památce Babiččino údolí, nedaleko Ratibořického zámku a obce Zlích. Jeho hlavní funkcí je rozdělovat průtok mezi koryto řeky Úpy a Úpský přivaděč, kterým je voda převáděna do vodní nádrže Rozkoš.

2 POPIS MODELOVANÉHO ÚZEMÍ

2.1 Vodní dílo Rozkoš

2.1.1 Obecné údaje

Vodní dílo Rozkoš se nachází ve východních Čechách v Královéhradeckém kraji, okres Náchod.



Obrázek 2.1 Obrys mapy ČR s umístěním vodního díla Rozkoš

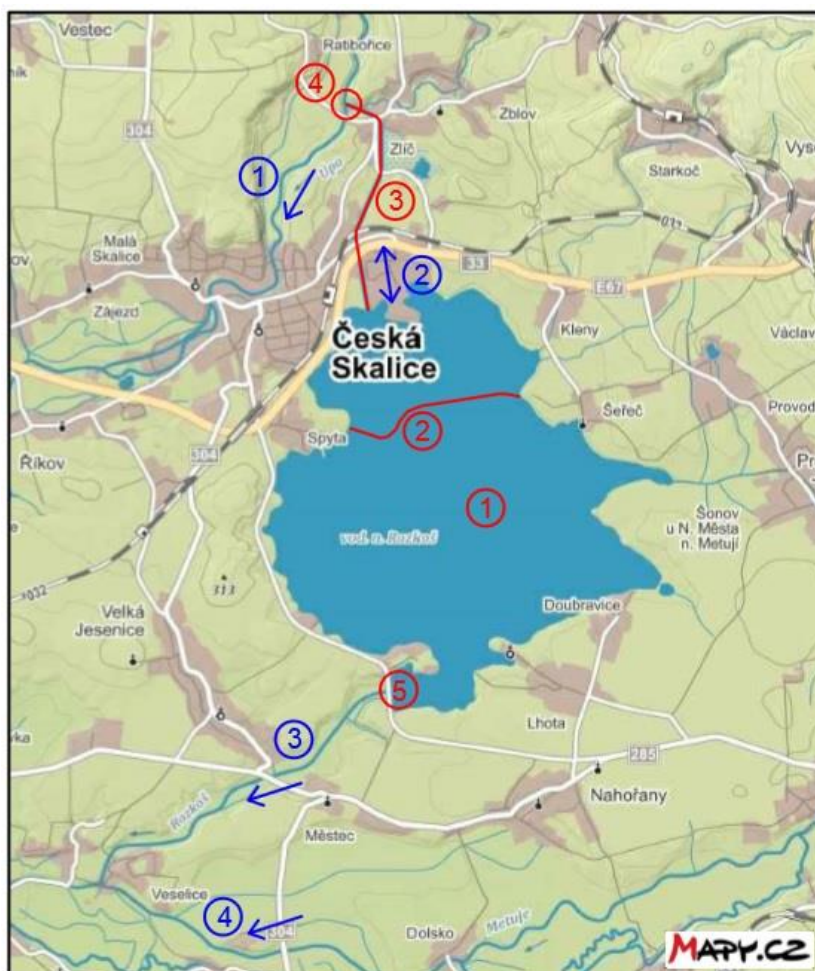
Jeho součástí jsou čtyři objekty:

- a) vodní nádrž Rozkoš
- b) vodní elektrárna pod hlavní hrází
- c) Úpský přivaděč
- d) klapkový jez na řece Úpě

Vodní nádrž Rozkoš je intervenční nádrž a je napájena uměle vybudovaným Úpským přivaděčem, který převádí vodu z řeky Úpy. Malou měrou je nádrž napájena i Rozkošským potokem, do jehož údolí je nádrž situována.

Vodní nádrž byla po dlouhých letech plánování vybudována v letech 1965–1972. Vodní elektrárna pod hlavní hrází byla následně vybudována až v roce 2008. [1]

Vodní nádrž Rozkoš je vodní dílo II. kategorie. Nachází se v pánvi mezi řekami Úpou a Metují. Prvotní plán v 50. letech 20. století byl vybudovat přivaděče z obou řek, jak z Úpy, tak Metuje, které by bylo možné používat pro obousměrné proudění vody. Nakonec se realizoval pouze přivaděč z řeky Úpy. Voda z vodní nádrže odtéká Rozkošským potokem, který ústí do řeky Metuje.



- | | |
|----------------------|-------------------|
| ① Vodní nádrž Rozkoš | ① Úpa |
| ② Rovenská hráz | ② Úpský přivaděč |
| ③ Úpský přivaděč | ③ Rozkošský potok |
| ④ Jez na Úpě | ④ Metuje |
| ⑤ Vodní elektrárna | |

Obrázek 2.2 Přehledná situace VD Rozkoš [2]

Hlavní vodohospodářské účely vodní nádrže Rozkoš jsou (seřazeno podle důležitosti)

[1]:

- a) kompenzační nadlepšování průtoků v Labi do profilu Opatovice nad Labem
- b) dotace průtoků Rozkošského potoka pod nádrží
- c) zadržení vody v nádrži k částečné ochraně území podél řeky Úpy od České Skalice po Jaroměř v případě výskytu povodní
- d) rekreace
- e) rybochovné účely (klecový odchov pstruhů v nádrži, sádky pod hlavní hrází)



Obrázek 2.3 Pohled z hlavní hráze na elektrárnu a sádky

Dále je vodní dílo Rozkoš využíváno pro výrobu elektrické energie ve vodní elektrárně umístěné pod tělesem hlavní hráze.

2.1.2 Ochranná funkce vodní nádrže Rozkoš

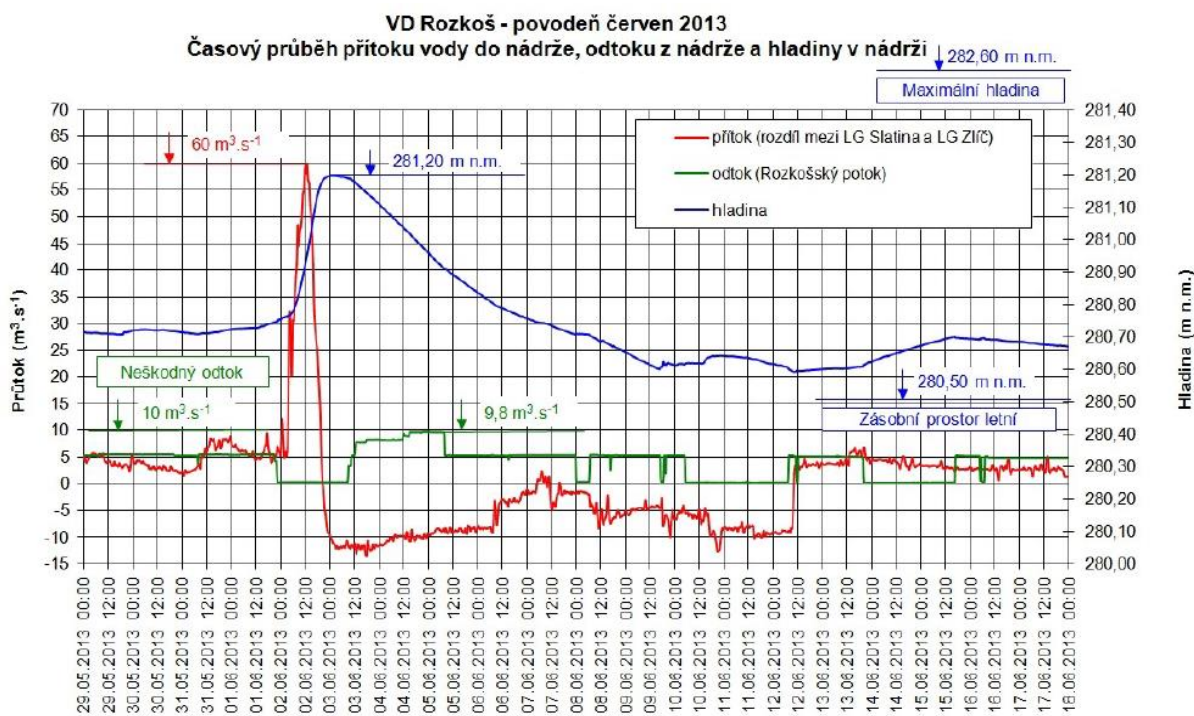
Ochranná funkce vodní nádrže Rozkoš spočívá v odvádění části povodňového průtoků z koryta řeky Úpy Úpským přivaděčem. Snížení průtočného množství ochraňuje obce na řece Úpě v úseku pod jezem ve Zlíči, od České Skalice po město Jaroměř, kde řeka Úpa ústí do řeky Metuje.

Podle manipulačního řádu vodního díla Rozkoš je ochranná funkce v pořadí důležitosti až na třetím místě. Důležitějšími funkcemi je nadlepšování průtoků pro profil Opatovice nad Labem a dotace průtoků Rozkošského potoka [1].

Neškodný průtok pro úsek pod jezem ve Zlíči má hodnotu $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Část povodňového průtoku přesahující tuto hodnotu je odvedena Úpským přivaděčem do vodní nádrže Rozkoš [1].

Pokud je naplněn ovladatelný ochranný prostor nádrže, dochází manipulací s klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči k zastavení proudění vody přivaděčem směrem do nádrže a veškerý průtok zůstává podle manipulačního řádu v korytě řeky Úpy [1].

Jakmile se povodňový průtok na řece Úpě dostane pod hodnotu $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, dojde k prázdnění ochranného ovladatelného prostoru nádrže Úpským přivaděčem, který lze používat pro obousměrné proudění vody. Manipulací s klapkovým uzávěrem se zajistí konstantní průtok $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v úseku pod Zlíčským jezem, kdy je povodňový průtok doplňován průtokem z vodní nádrže Rozkoš.



Obrázek 2.4 Průběh povodně v roce 2013 na VD Rozkoš [3]

Z Obrázku 2.4 je patrná aplikace manipulačního řádu vodního díla Rozkoš při povodňovém stavu. Dosud největší povodeň, která se vyskytla na řece Úpě po rekonstrukci objektu v roce 2007 byla povodeň v červnu 2013. Přítok do vodní nádrže Rozkoš je dán rozdílem průtoků naměřených na limnigrafických stanicích ve Slatině (na řece Úpě, asi 3 km před jezem ve Zlíči) a Zlíči (pod rozdělovacím objektem u Vilémova mostu). [3]

Dne 2.6.2013 přibližně kolem šesté hodiny ranní se po manipulaci s klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči začala převádět část povodňového průtoku do vodní nádrže Rozkoš podle manipulačního řádu VD Rozkoš. Zároveň byl také zastaven odtok z nádrže kvůli vyhlášení prvního stupně povodňové aktivity na řece Metuji. Kolem 22. hodiny se začala nádrž významně plnit. Průtok převáděný z řeky Úpy dosáhl maxima $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Po odeznění povodňové vlny byla nádrž prázdněna zpětným převáděním vody Úpským přivaděčem (záporná hodnota přítoku v grafu). Oboustranné proudění vody je možné díky malému podélnému sklonu 0,075 % v přivaděči. Hladina v nádrži dosáhla maximální kóty 281,20 m n. m. Celkově bylo v nádrži zachyceno 4,59 mil. m^3 vody. [3]

2.1.3 Popis rozdělovacího objektu ve Zlíči

Rozdělovací objekt je součástí vodního díla Rozkoš a nachází se na řece Úpě v úseku ř. km 14,780 – ř. km 15,323, v národní přírodní památce Babiččině údolí. Objekt je tvořen jezem ve Zlíči, nátokem do přivaděče, který převádí vodu z řeky Úpy do vodní nádrže Rozkoš, přilehlými hrázkami, které soustřeďují povodňový průtok do koryta řeky Úpy a inundačním přelivem, který převádí část průtoku do pravostranného inundačního území.



- ① Inundační přeliv
- ② Pravobřežní zemní hrázka
- ③ Nátok do přivaděče
- ④ Jez ve Zlíči
- ⑤ Vilémův most

Obrázek 2.5 Schéma rozdělovacího objektu [2]

K profilu jezu ve Zlíči se vztahuje celková plocha povodí 415,37 km². Průtoky s pravděpodobností výskytu jednou za N let jsou uvedeny v následující tabulce:

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
Q _N [m ³ .s ⁻¹]	52	74	109	139	171	217	256

Tabulka 2.1 Tabulka N-letých průtoků v profilu jezu ve Zlíči

Jez v obci Zlích se nachází na řece Úpě ř. km 14,780 asi 140 m proti proudu od Vilémova mostu. Pole jezu je dlouhé 20 m a je hrazené ocelovou dutou klapkou výšky 3,15 m. Betonový práh jezu je na kótě 279,80 m n. m., kóta maximálně vztyčené klapky je tedy 282,95 m n. m. [1]

V roce 2007 byla provedena rekonstrukce vodního díla Rozkoš včetně rozdělovacího objektu na základě výpočtů z programů jednorozměrného matematického modelování ustáleného proudění Hydrocheck 1 a Hydrocheck 2. Podle výsledků modelování nevyhovovala tehdejší podoba objektu požadavkům na rozdělení průtoku, a tak byly horní části obou pilířů navýšeny betonovou zídkou z kóty 284,30 m n. m. na současnou hodnotu 284,85 m n. m. [4]



Obrázek 2.6 Levý jezový pilíř

V roce 2016 proběhla na objektu jezu další úprava. Státní podnik Povodí Labe nechal vybudovat obtokový kanál v levém pilíři jezu. Účel tohoto opatření je možnost převádět rozdělovacím objektem větší průtočné množství při plném vztyčení klapky a maximálního možného odtoku do vodní nádrže Rozkoš.

Kromě této úpravy byly opraveny deformované rozrážeče, osazeny nové kryty klapky, vyměnilo se boční těsnění u klapky a také proběhla výměna ložisek s novou maznicí. Také byla instalována nemrznoucí hmota na boční štíty klapky.



Obrázek 2.7 Nejnovější úprava na Zličském jezu – obtokový kanál v levém pilíři

Při řešení této diplomové práce nebylo uvažováno s touto úpravou. Objekt tedy zůstal ve stejné podobě, jako při řešení bakalářské práce.

Ovládání klapkového jezového uzávěru je automatické a lze ho nastavit na dva režimy:

- 1) Konstantní průtok v korytě řeky Úpy v úseku pod jezem směrem na Jaroměř – tzv. regulace na průtok – systém je ovládán podle limnigrafu u Vilémova mostu, který se nachází asi 190 metrů pod jezem. Informace jsou převáděny do řídicího systému klapkového uzávěru a ten manipulací s klapkou udržuje v korytě konstantní průtočné množství. [1]
- 2) Udržování konstantní hladiny na jezu – tato varianta je vhodná pro převádění konstantního průtočného množství do vodní nádrže Rozkoš Úpským přivaděčem, které je dáno právě vzduším v nadjezí. [1]

Další součástí jezu je vývar. Dno vývaru má kótu 277,05 m n. m. a jeho délka je 11,25 m. Vývar je ukončen prahem ve sklonu 1:3 a kótě 278,75 m n. m. Na práh navazuje zához z těžkého kamene.

Maximální ovladatelný průtok jezovým tělesem je při plně položeném klapkovém uzávěru $190 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



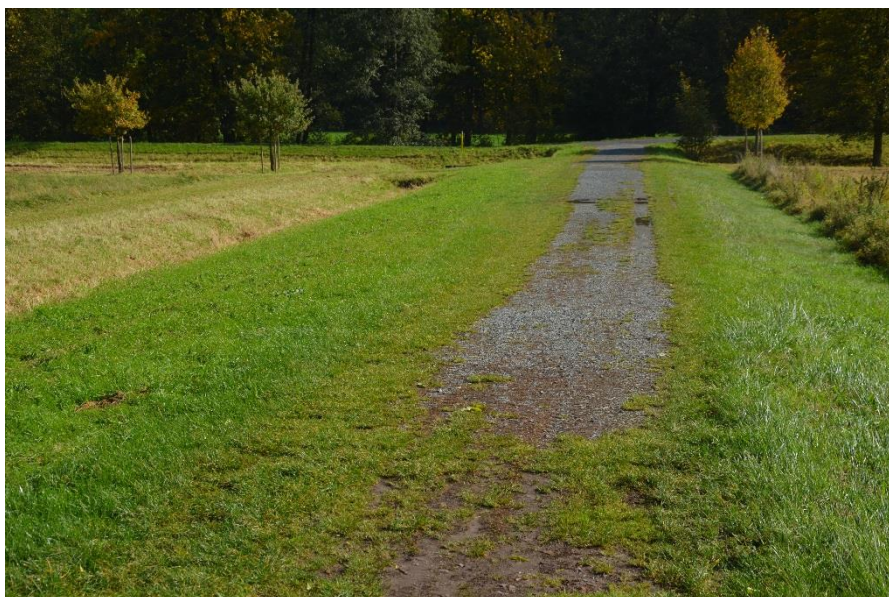
Obrázek 2.8 Jez ve Zličí, ř.km 14,780 – pohled proti proudu

V úseku nad jezem je navýšen pravý břeh zemní hrázkou, která zajišťuje potřebné vzduť v nadjezí. Po její koruně vede asfaltová komunikace. Hrázka je dlouhá 560 m a vychází z pravobřežního pilíře jezu. Je zakončena v místě napojení nezpevněné příjezdové cesty k Ratibořickému zámku. Celá koruna hráze je 3 m široká. Svahy jsou zatravněny. [4]



Obrázek 2.9 Zemní hrázka s asfaltovou komunikací

Při rekonstrukci rozdělovacího objektu v roce 2007 byl nově vybudován přejezdný inundační přeliv na nezpevněné příjezdové cestě vedoucí k Ratibořickému zámku. Příjezdová cesta je navýšena nad okolním terénem Babiččina údolí. Koruna komunikace je v místě inundačního přelivu zavázána betonovými prahy. Přeliv je 50 m dlouhý a 3,6 m široký. [4]



Obrázek 2.10 Přejezdný inundační přeliv

Vybudování zemní hrázky v nadjezí a přejezdného inundačního přelivu dochází podle návrhu k rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu mezi koryto řeky Úpy a pravostrannou inundací [11]:

Q_{100}	Pravostranná inundace	Koryto řeky Úpy
$256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 2.2 Rozdělení průtoku podle návrhu

Dále je průtok v korytě řeky Úpy rozdělen v nadjezí mezi přivaděč a úsek koryta řeky Úpy pod jezem:

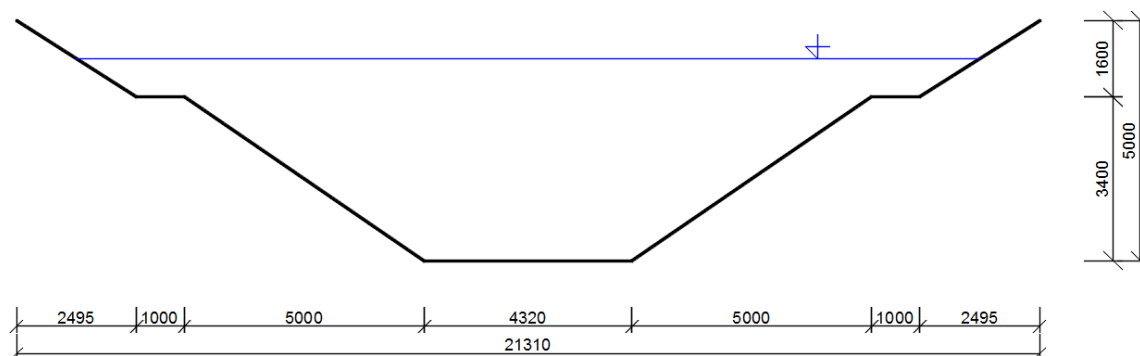
Q_{100}	Koryto řeky Úpy pod jezem	Přivaděč
$256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 2.3 Rozdělení průtoku v korytě řeky Úpy

2.1.4 Úpský přivaděč

Úpský přivaděč je uměle vybudovaný kanál spojující řeku Úpu, ř. km 14,815, s vodní nádrží Rozkoš. Měří 2337 m a hodnota jeho průtoku je regulována manipulací s klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči. Dno přivaděče má podélný sklon 0,075 %. Tento mírný podélný sklon umožňuje proudění v obou směrech. Přivaděč tak může být používán i pro prázdnění nádrže. Tento fakt vysvětluje absenci bezpečnostního přelivu na přehradním tělese vodního díla Rozkoš. V případě naplnění ochranného prostoru dochází manipulací klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči k zpětnému proudění vody do koryta řeky Úpy. [1]

Vtok přivaděče navazuje na levý pilíř jezu a je nálevkovitě rozšířen a přehrazen 105 cm vysokým betonovým prahem. Kóta prahu je 280,10 m n. m. Přes přivaděč vedou čtyři silniční mosty, jeden železniční a dvě pěší lávky. Přivaděč volně ústí do vodní nádrže Rozkoš a je ukončen betonovým prahem na kótě 277,00 m n. m. [10]



Obrázek 2.11 Vzorový příčný profil přivaděče

Dno přivaděče má šířku 4,32 m a je opevněno betonovou vrstvou tloušťky 20 cm. Svahy první části složeného lichoběžníku jsou ve sklonu 1:1,5 a jsou kryty betonovými panely o tloušťce 12 cm na 20 cm silném šterkopískovém loži. Kyneta má hloubku 3,4 m a šířku 14,52 m. Druhá část složeného lichoběžníku má hloubku 1,60 m, lavičky mají šířku 1,0 m. Celková hloubka přivaděče je 5,0 m a šířka 21,31 m. [1]

Maximální kapacitní průtok přivaděče byl navýšen na současnou hodnotu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ z původní hodnoty $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při rekonstrukci v roce 2007 vybudováním hrázek v horní části přivaděče mezi nátokem do přivaděče a silničním mostem v obci Zlích, ř. km 1,945. [4]



Obrázek 2.12 Úpský přivaděč v obci Zlích

2.2 Modelovaná oblast

Předmětem této práce je vytvoření matematického modelu rozdělovacího objektu tvořeného jezem ve Zlích, ř. km 14,780, Úpským přivaděčem a zemní hrázkou v nadjezí. Vrchní profil rozdělovacího objektu je ve staničení ř. km 15,323 na řece Úpě, kde je umístěn inundační přeliv.

Modelovaná oblast byla zvětšena o nátokovou a výtokovou oblast, aby došlo k dostatečnému rozdělení proudění v zájmové oblasti. Za horní profil na řece Úpě byl zvolen profil ř.km 16,300 v dostatečné vzdálenosti od zástavby v Babiččině údolí (Ludrův mlýn a další budovy). Jako dolní profil byl zvolen profil v zúžení Babiččina údolí, ř.km 13,358. Dolní profil v Úpském přivaděči byl zvolen na staničení ř. km 0,030. Jedná se o profil u vstupu do vodní nádrže Rozkoš.



- | | |
|-------------------------------------|------------------|
| ① Horní profil modelované oblasti | ① Úpa I |
| ② Lokální zástavba, Ludrův mlýn | ② Úpský přivaděč |
| ③ Cihelná zeď, výška 3,5 m | ③ Olešnice |
| ④ Areál Ratibořického zámku | ④ Úpa II |
| ⑤ Rozdělovací objekt | |
| ⑥ Lokální zástavba, Lovecký pavilon | |
| ⑦ Dolní profil modelované oblasti | |

Obrázek 2.13 Přehledná situace modelované oblasti [2]

3 PŘEHLED PROBLEMATIKY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY

3.1 Historie matematického modelování

3.1.1 První prvky hydroinformatiky

Matematické modelování proudění vody je součástí oboru hydroinformatika.

„Hydroinformatika je vědní disciplína spojující prvky hydrosféry s moderní informační technologií.“ [5]

Heidegger takto charakterizoval toto odvětví informatiky v roce 1977. Základním předpokladem pro tvorbu simulačních modelů, které jsou součástí hydroinformatiky, je znalost neustálých jevů a jejich teoretického popisu [5].

Teoretický popis přírodních jevů, mezi které patří i popis proudění vody v otevřených korytech, je velmi složitou záležitostí. Výpočetní technika používá při jejich výpočtu řídicí rovnice. Bez výpočetní techniky by bylo velmi složité řešit rozsáhlé matice vytvořené algoritmy. Právě tento předpoklad vedl k založení nové vědní disciplíny, hydroinformatiky. Při použití klasické výpočetní hydrauliky byly výsledky tvořeny ve formě tabulek. Simulační prostředky slouží i k lepší prezentaci výsledků. Výpočetní programy umožňují i grafickou prezentaci výsledků [5].

Simulační modely byly podle publikace [5] rozděleny do pěti generačních stupňů:

- 1. generace simulačních modelů byla v 50. letech 20. století, kde byly k dispozici první kalkulátory a analogové počítače. Během této generace probíhaly jednoduché výpočty a vyhodnocení dat.
- 2. generace simulačních modelů ze 60. let 20. století je charakterizována použitím nových výpočetních principů a numerických metod – metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí a metoda hraničních prvků [5].
- V 70. letech 20. století, během třetí generace, vznikaly standardizované operace. Zjednodušila se obsluha výpočetní techniky a problematika začala být přístupnější veřejnosti [5].
- 4. generace probíhající od roku 1986 je spjata s nástupem PC (osobních počítačů). Počítače se dostaly mezi širokou veřejnost, a to znamenalo velký rozmach celého odvětví. Navíc jsou simulační modely vybaveny nabídkovým systémem, kde si uživatel volí jednotlivé operace. Prvním softwarem pro výpočet hydrodynamických

jevů byl program MOUSE, který je vyvinut pro výpočet ve stokových sítích. Dále ho doplnil program srážko-odtokový model MIKE-11 [5].

- Pátá generace právě probíhá a její podoba se stále odvíjí od vývoje výpočetní techniky.

3.1.2 Pojem hydroinformatika

Jak již bylo uvedeno, hydroinformatika je věda, která spojuje prvky hydrosféry s moderní informační technologií. Pro lepší představu samotného významu slova byla úloha hydroinformatiky rozepsaná podle publikace [5] do základních komponentů:

Hydroinformatika musí respektovat

- a) právní normy dané oblasti (např. limity pro znečištění vody v říční síti)
- b) musí respektovat právní úpravy a vyhlášky s omezenou platností
- c) fyzikální, chemické, biologické a materiálové parametry
- d) meteorologické, hydrologické a hydrodynamické parametry (srážkové úhrny, hydrogramy povodňových vln atd.)
- e) monitorovací a měřicí síť, která může podávat relevantní informace
- f) kvalitativní a kvantitativní požadavky uživatelů vodních zdrojů
- g) umístění a popis zdrojů znečištění v hydrosféře
- h) technický popis regulačních prvků (např. jezů) a jejich umístění v souřadnicovém systému
- i) okrajové a počáteční podmínky pro danou modelovanou oblast
- j) základní cíle a požadavky

V roce 1991 charakterizoval M. B. Abbott pojem hydroinformatické systémy.

„Hydroinformatické systémy představují integrovanou formu systémů umělé inteligence, výpočetních simulačních prostředků a kompatibilních informačních systémů pro přímé řízení vodohospodářských systémů.“ [5]

Hydroinformatické systémy poskytují podle Abbotta (1991) uživateli úplné odpovědi na libovolná zadání s různými aspekty v reálném čase. I v tomto aspektu je velmi důležité pochopit a správně fyzikálně popsat přírodní neustálené jevy [5].

Abbott také v roce 1991 spojil další vývoj hydroinformatických systémů s dalším pokrokem ve vývoji hardwaru a informačních technologií. Vzhledem k velkému pokroku

informační technologie se softwary pro matematické modelování neustálých přírodních jevů neustále zdokonalují.

3.2 Typy matematických modelů

3.2.1 Bezrozměrné matematické modely

U bezrozměrných matematických modelů se předpokládá dokonalé promísení kapaliny, a tudíž její stejné chemické vlastnosti po celém objemu modelované oblasti. Používají se zejména pro řízení vodních nádrží a malých jezer, kde je splněn obecný předpoklad dokonalého promísení.

3.2.2 Jednorozměrné matematické modely

Použití jednorozměrných matematických modelů je vhodné zejména pro koryta s nízkou mírou meandrování a pro méně morfologicky složitě toky. Prostředí je definováno příčnými profily, které kromě geometrie obsahují hydraulické vlastnosti (vzdálenost od následujícího profilu, drsnostní součinitele, břehové linie). Proudění je u jednorozměrného modelu popsáno v jednom směru středními hodnotami veličin – hloubka vody, rychlost proudění a průtočné množství. Důležitým faktorem je volba umístění příčných profilů. Ty by měly být voleny tak, kde je možné předpokládat lineární přestup v geometrii a hydraulických parametrech mezi jednotlivými profily.

1D MODEL Y:

- HYDROCHECK 1
- HYDROCHECK 3
- MIKE 11
- MOUSE
- HEC-RAS

3.2.3 Dvourozměrné matematické modely

Dvourozměrné matematické modely jsou vhodné pro koryta s nepravidelným a rozsáhlým inundačním územím. Používá se v případech, kdy jednorozměrné matematické modelování nemá vypovídající hodnotu ať už v případě morfologicky složitých toků s velkou mírou meandrování nebo u objektů, kde je jednorozměrné modelování nevhodné. Svislicové rychlosti a hloubka vody jsou počítány pro elementy, ze kterých je složena výpočetní síť. Pohyb ve dvou horizontálních rozměrech umožňuje zachycení rozlivu

v inundačním území. Nevýhodou dvourozměrných matematických modelů je vysoká náročnost na výpočetní techniku. Výpočty většinou trvají v řádu hodin.

Řídící rovnice, popisující hydraulické jevy proudění kapaliny, vyžadují použití modelů v mělkých vodách.

Pro sestavení dvourozměrného modelu je zapotřebí bodové zaměření celé modelované oblasti, nikoliv jen příčné profily jako v případě jednorozměrného matematického modelu.

2D MODELY:

- SMS
- MIKE 21
- HEC-RAS 5.x.x

3.2.4 Trojrozměrné matematické modely

Trojrozměrné modely jsou relativně novou záležitostí a neustále dochází k jejich vývoji. Používají se zejména pro modelování objektů na vodním toku (elektrárny, mostní objekty, jezové objekty). Jejich náročnost na výpočetní techniku je vysoká, a tak je možné modelovat jen velmi malé oblasti. Například při důkladném modelování mostních objektů se používá kombinace dvourozměrného a trojrozměrného modelování. Dvourozměrné modelování je použito při modelování hloubky a rychlostí v toku a dále jsou tyto výpočty použity jako okrajové podmínky pro trojrozměrné modely.

3D MODELY:

- COMSOL Multiphysics
- ANSYS

3.3 Stavba matematického modelu

Matematický model vyjadřuje vztah mezi vstupními, stavovými a výstupními množinami veličin. Vstupní veličiny jsou charakterizovány počátečními a okrajovými podmínkami pro dynamický systém. Stav systému představuje okamžitý stav paměťových míst systému. Výstupní veličiny jsou vyjádřené množinou časových funkcí, které popisují chování systému [5].

3.3.1 Základní cíle

Před začátkem vytváření matematického modelu je prioritou určení základních cílů. Na základě vlastností základních cílů se řešitel musí rozhodnout, zda bude při simulaci proudění vody používat neustálené nebo ustálené proudění, dále jaký rozměr modelu je pro modelovanou oblast nejvhodnější, zda jednorozměrný, dvourozměrný nebo trojrozměrný. Dále se musí řešitel rozhodnout, jak přesné metody řešení jsou vzhledem k velikosti modelované oblasti zapotřebí, jaké výsledky chce získat (např. jaký časový krok je potřeba zvolit). Další důležitou otázkou je volba a dostupnost okrajových a počátečních podmínek [5].

3.3.2 Základní řídicí rovnice

Při popisu nestacionárních přírodních jevů se používají bilanční rovnice – rovnice kontinuity (zákon zachování hmotnosti), bilance hybnosti (zákon zachování hybnosti) a zákon zachování energie, které se doplňují empirickými vzorci a součiniteli [5].

3.3.3 Schematizace

Model je zjednodušený popis reality. Fyzikální podstatu problému je potřeba zjednodušit do jisté formy, kdy lze daný problém popsat bilančními rovnicemi a je možné jej schematizovat na matematický model. Je na řešiteli, jakou schematizaci modelu použije [5].

3.3.4 Metody řešení řídicích rovnic

V určité míře schematizovaný model lze řešit dvěma cestami. První cestou je přímé řešení, které se používá u jednorozměrného modelu při ustáleném proudění metodou po úsecích. Jedná se o přesné matematické řešení integrací.

Další metodou přibližné řešení numerickými metodami. Průběh nestacionárních jevů je nahrazen známou matematickou funkcí tak, aby vyhovovala počátečním a okrajovým podmínkám modelované oblasti. Jedná se do jisté míry o nepřesné řešení, odchylka od reálného průběhu je však zanedbatelná. Nejznámější jsou tři řešení – metoda konečných prvků, metoda konečných objemů a metoda konečných diferencí.

3.3.5 Verifikace a kalibrace modelu

Velmi důležité je srovnávat výsledky z modelu s hodnotami naměřenými ve skutečnosti, aby bylo možné prohlásit model za platný. Tato část tvorby modelu se nazývá verifikace. Příkladem mohou být naměřené hodnoty hladin při známých průtocích. U numerické metody dochází k vytvoření přibližné funkce, která se potom porovnává

s naměřenými hodnotami. Jako okrajové podmínky volíme hodnotu průtoku v modelu. A tak lze ve výsledcích zkontrolovat hodnoty hladin například u limnigrafické stanice příslušného toku. Koeficienty (koeficient přepadu, Manningův součinitel drsnosti) se poté upraví na takové hodnoty, aby byly úrovně hladin stejné. Tento proces se nazývá kalibrace. Poté na řadu přichází opět verifikace modelu, kdy znovu porovnáme úrovně hladin tentokrát pro jinou hodnotu průtoku. Pokud se úrovně hladin rovnají, lze prohlásit model za verifikovaný. Pokud ne, proces se opakuje. Po provedení kalibrace a verifikace je model připraven pro použití v praxi.

4 VÝPOČETNÍ PROGRAM HEC-RAS

4.1 HEC-RAS

HEC-RAS je počítačový software určen převážně pro modelování proudění vody v říčních korytech. Kromě modelování proudění vody je součástí programu i rozhraní pro výpočet pohybu sedimentů, analýzy teploty vody a pro zobecněné modelování kvality vody. Byl vyvinut hydrologickým centrem inženýrů (Hydrologic Engineering Center) společně s americkou federální vládou pro potřeby armády Spojených států amerických [6]. Velkou výhodou pro běžného uživatele je fakt, že je volně přístupný ke stažení na webových stránkách. Díky tomu má tento program velkou uživatelskou základnu a různá internetová diskuzní fóra obsahují velké množství rad a tipů vycházejících z předchozích zkušeností uživatelů.

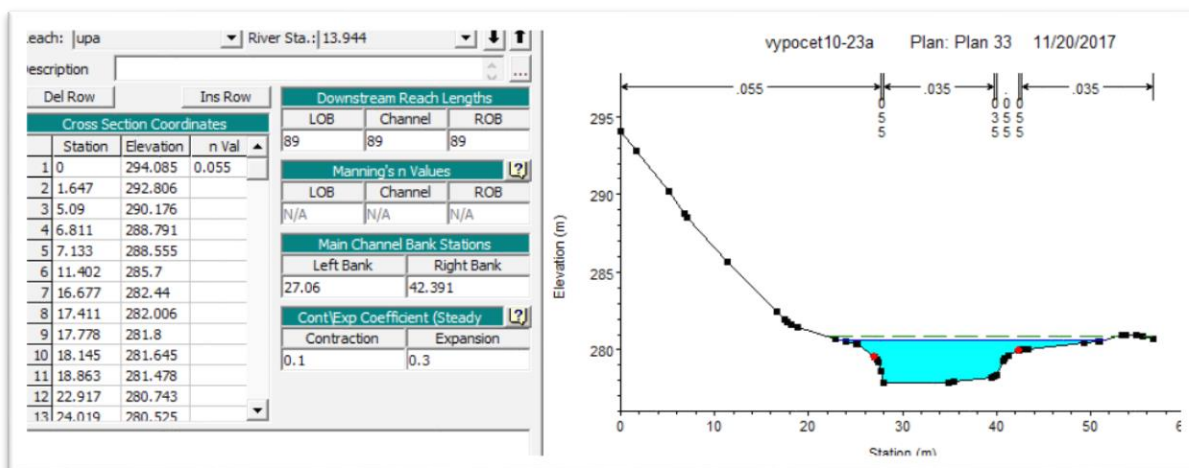
Software HEC-RAS byl vydán již v pěti verzích s řadou aktualizací. První verze byla uvedena na trh v roce 1995 [6]. První čtyři verze byly k dispozici pouze s možností modelovat pomocí jednorozměrného matematického přístupu jak pro ustálené, tak pro neustálené proudění.

Verze HEC-RAS 5.x.x vyšla s další možností výpočtu – dvourozměrné matematické modelování neustáleného proudění vody v mělkých vodách. Další možností modelování je kombinace jednorozměrného přístupu, který je používán pro oblast koryta řeky a objekty, a dvourozměrného přístupu vhodného pro inundační území. Tyto dva přístupy lze kombinovat pro jednu řešenou oblast.

4.2 Jednorozměrné neustálené proudění v programu HEC-RAS

4.2.1 Základní předpoklady

Výpočet jednorozměrného neustáleného proudění v programu HEC-RAS je řešen řídicími rovnicemi vycházejících ze zákona zachování hmotnosti a ze zákona zachování hybnosti. Při jednorozměrném proudění se uvažuje pouze s pohybem v jednom horizontálním směru. Rychlosti v druhém horizontálním směru jsou stejně jako rychlosti ve vertikálním směru zanedbávány. Koryto s inundačním územím je rozděleno na příčné profily, které jsou kolmé na směr proudění. Každý profil charakterizuje staničení v toku (ř. km).



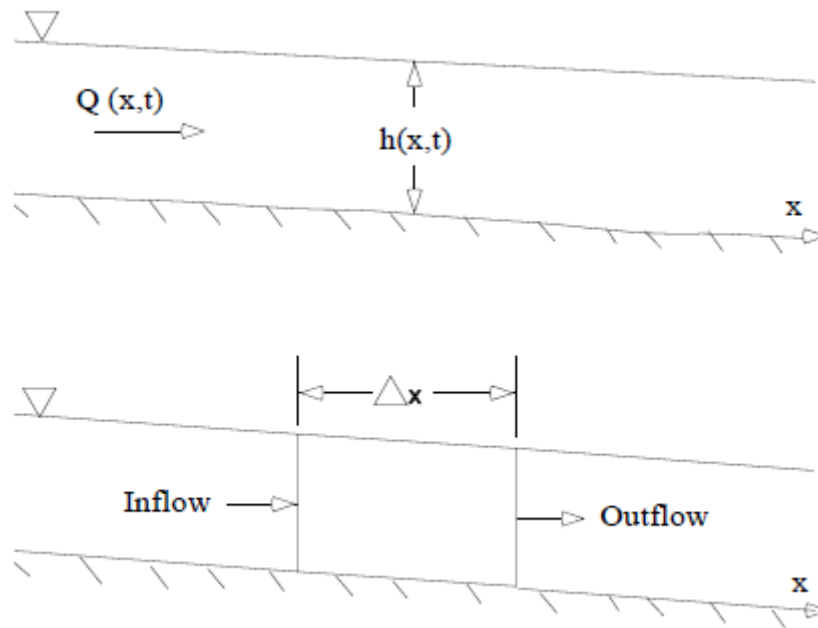
Obrázek 4.1 Příčný profil vložený do programu HEC-RAS

Příčný profil je rozdělen do tří částí, které jsou rozděleny břehovými liniemi. Prostřední část reprezentuje koryto vodního toku, postranní části oblast inundace. Pro tyto oblasti lze zvolit jiné hodnoty Manningova součinitele drsnosti (*Manning's n Values*). Pokud má příčný profil více než tři úseky s rozdílnou drsností, lze jej rozdělit do více zón s různou hodnotou součinitele (viz *Obrázek 4.1*). Dále je příčný profil charakterizován vzdáleností k dalšímu příčnému profilu směrem po proudu (*Downstream Reach Lengths*). Vzdálenosti jsou celkem tři, jedna vystihuje délku mezi koryty, další dvě mezi inundačním územím určeného levou a pravou břehovou linií. Při výpočtech program HEC-RAS uvažuje zvlášť oblast koryta a oblasti inundace.

4.2.2 Hydraulické rovnice

Řídícími rovnicemi při výpočtu rychlostí a úrovně hladiny pro jednorozměrné neustálené proudění jsou rovnice spojitosti a 1D Saint-Venantovy rovnice.

4.2.2.1 Rovnice spojitosti – zákon zachování hmotnosti



Obrázek 4.2 Schéma elementárního objemu [7]

Objemové množství, které přitéká do elementárního objemu s rozměrem x :

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.1)$$

Objemové množství, které odtéká z elementárního objemu s rozměrem x :

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.2)$$

Změna objemu v elementárním objemu o délce x :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x \quad (4.3)$$

Celková změna objemu v soustavě je:

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right] \quad (4.4)$$

Výsledná rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4.5)$$

Pokus se do rovnice přidá prvek změny objemu elementu, výsledná rovnice kontinuity vypadá následovně:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4.6)$$

Rovnice (4.6) může být použita jak pro oblast koryta, tak pro oblast inundace:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x_c} = q_f \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q_f}{\partial x_f} + \frac{\partial S}{\partial t} = q_c + q_l \quad (4.8)$$

Na rozdíl od ustáleného proudění, počítá program HEC-RAS neustálené proudění s průměrnou hodnotou břehových linií mezi dvěma příčnými profily.

$$\frac{L_l + L_r}{2} = L_f \quad (4.9)$$

Po převedení parciálních diferenciálních rovnic na metodu konečných objemů, dostáváme zjednodušené rovnice.

$$\frac{\Delta A_c}{\Delta t} + \frac{\Delta Q_c}{\Delta x_c} = \bar{q}_f \quad (4.10)$$

$$\frac{\Delta A_f}{\Delta t} + \frac{\Delta Q_f}{\Delta x_f} + \frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{q}_c + \bar{q}_l \quad (4.11)$$

Obě rovnice tvoří finální rovnici, kterou používá program HEC-RAS při výpočtu jednorozměrného neustáleného proudění [7].

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_f}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} \Delta x_c - \bar{Q}_l = 0 \quad (4.12)$$

4.2.2.2 1D Saint-Venantovy rovnice – zákon zachování hybnosti

Změna hybnosti je rovna vnějším silám působících na soustavu. Pro oblast koryta a inundace lze zákon zachování hybnosti vyjádřit v následujících formách [7]:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial (V_c Q_c)}{\partial x_c} + g A_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right) = M_f \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial t} + \frac{\partial (V_f Q_f)}{\partial x_f} + g A_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right) = M_c \quad (4.14)$$

Obě rovnice nezohledňují úroveň hladiny vody. Úroveň hladiny vody je v obou oblastech (inundace a koryto) stejná, proto v rovnicích tento prvek chybí.

Po převedení parciálních diferenciálních rovnic na metodu konečných objemů, dostáváme zjednodušené rovnice.

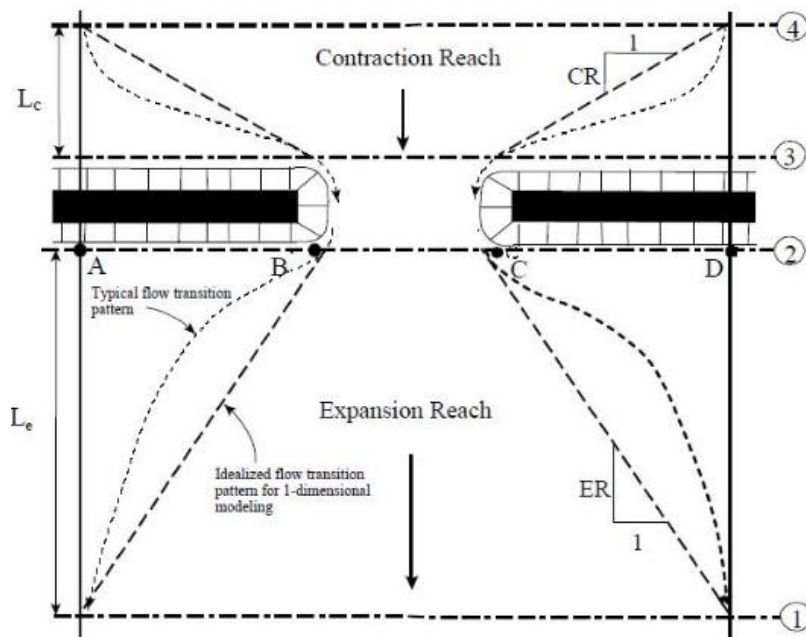
$$\frac{\Delta Q_c}{\Delta t} + \frac{\Delta (V_c Q_c)}{\Delta x_c} + g \bar{A}_c \left(\frac{\Delta z}{\Delta x_c} + \bar{S}_{fc} \right) = M_f \quad (4.15)$$

$$\frac{\Delta Q_f}{\Delta t} + \frac{\Delta(V_f Q_f)}{\Delta x_f} + g \bar{A}_f \left(\frac{\Delta z}{\Delta x_f} + \bar{S}_{ff} \right) = M_c \quad (4.16)$$

Obě rovnice tvoří finální rovnici, kterou používá program HEC-RAS při výpočtu jednorozměrného neustáleného proudění [7].

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t} + \Delta(V_c Q_c) + \Delta(V_f Q_f) + g(A_c + A_f) \Delta z + g \bar{A}_c \bar{S}_{fc} \Delta x_c + g \bar{A}_f \bar{S}_{ff} \Delta x_f = 0 \quad (4.17)$$

4.2.2.3 Modelování mostů



Obrázek 4.3 Modelování mostu v programu HEC-RAS [7]

HEC-RAS počítá energetické ztráty mostů ve třech částech. První ztráta se objevuje hned za objektem v místě, kde nastává rozšíření proudu (Obrázek 4.3 – část mezi profily 2 a 1). Druhá ztráta nastává při průtoku samotným objektem (Obrázek 4.3 – část mezi profily 3 a 2) a třetí při zúžení proudu před objektem (Obrázek 4.3 – část mezi profily 4 a 3).

Důležitou součástí modelování mostů v programu HEC-RAS je určení *ineffective area* v příčných profilech 3 a 4. Jedná se o části průtočného profilu v těchto příčných profilech, které nejsou aktivně zapojeny do výpočtů. V případě mostu to jsou boční části průtočného profilu před pilíři, jak je patrné z Obrázku 4.3.

Ztráta při průtoku samotným objektem může být v programu HEC-RAS počítána čtyřmi způsoby. U výpočtu záleží, zdali v úsecích před a pod mostem probíhá říční nebo bystřinné proudění. Pro jednotlivé varianty používá program různé metody výpočtu. První

variantou je momentová rovnice mezi profily před mostem a za mostem. Druhou variantou je energetická rovnice.

Program HEC-RAS umožňuje i výpočet tlakového proudění skrz mostní objekt a přepad vody přes mostovku. V případě modelování Babiččina údolí se v oblasti nevyskytuje most, přes jehož mostovku by se při uvažovaném povodňovém průtoku přelévala voda. V blízkosti mostů v Babiččině údolí se nachází pouze říční proudění.

Pro výpočet mostu v modelované oblasti bude využita metoda s energetickou rovnicí.

4.2.2.4 Modelování jezů

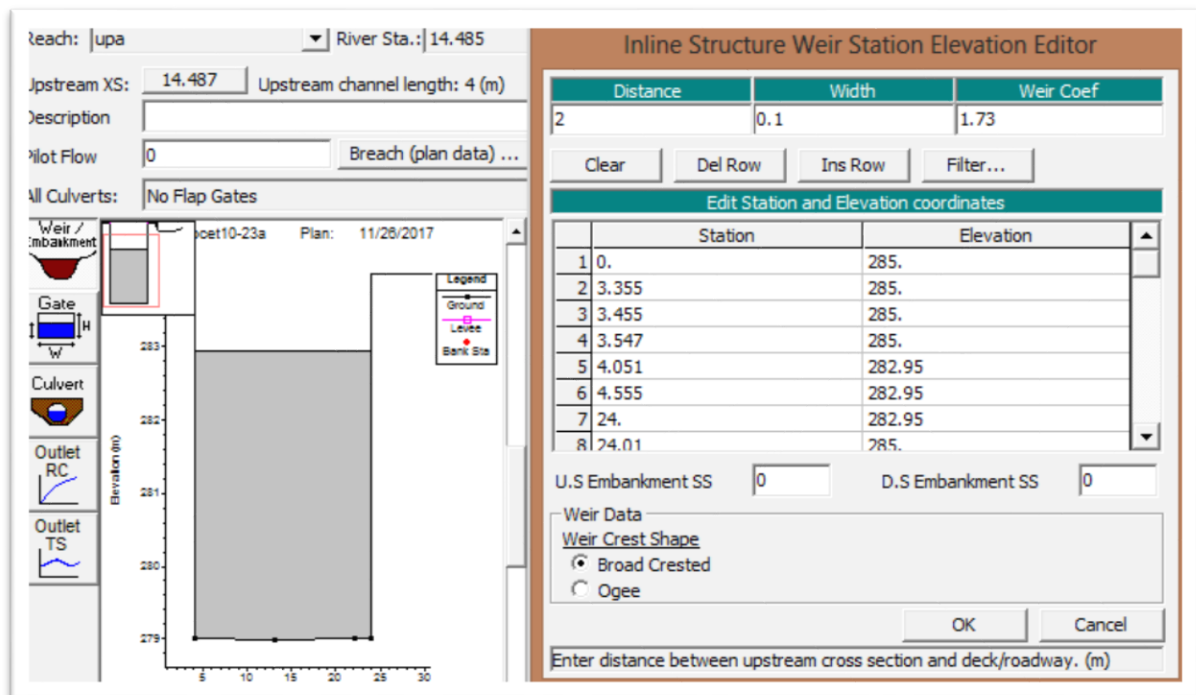
Program HEC-RAS používá klasickou přepadovou rovnici při řešení přelivů.

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}} \quad (4.18)$$

kde

$$C = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \quad (4.19)$$

Při výpočtech se v programu HEC-RAS zadávají dva parametry: tvar jezu a hodnota součinitele C [$\text{m}\cdot\text{s}^{-0.5}$].



Obrázek 4.4 Modelování jezu v programu HEC-RAS

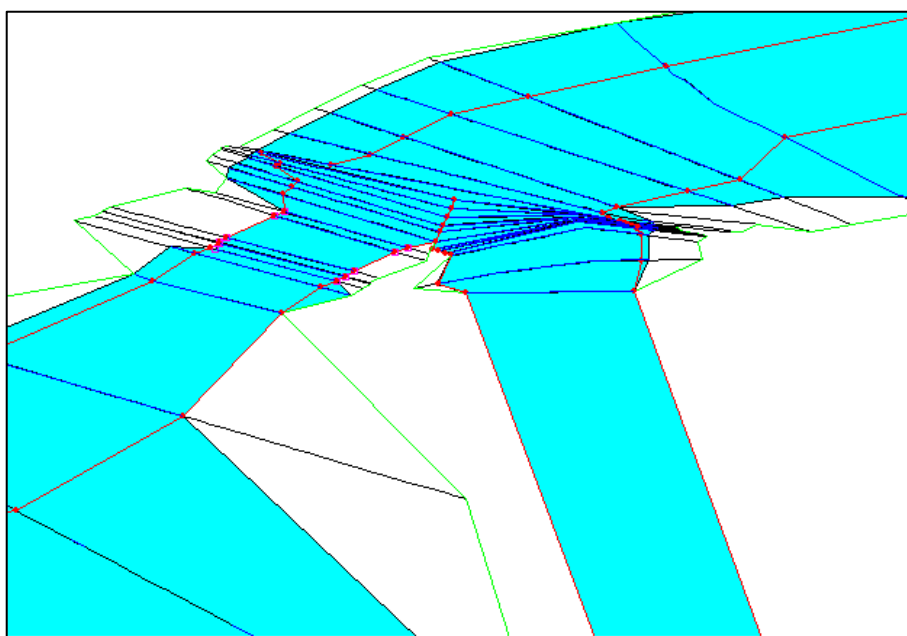
4.2.2.5 Modelování uzlů

V modelované oblasti Babiččina údolí bylo třeba řešit jeden uzel, a to rozdělení proudu mezi Úpský přivaděč a koryto s jezem ve Zlíči, ř. km 14,815.

Velmi problematické je výpočet uzlu pro ustálený stav proudění, a právě proto byl zvolen výpočet neustáleného proudění. Při ustáleném proudění je nutné definovat průtoky pro jednotlivé části koryt vzhledem k řešení modelu metodou po úsecích. A to je značně komplikovaná záležitost v případě, kdy je pro nás rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu nejasné.

Při neustáleném proudění lze vybrat mezi dvěma způsoby výpočtu. Prvním z nich je stejná úroveň hladiny ve všech profilech napojující se na uzel. Pokud tedy, jako v případě Babiččina údolí, máme hlavní koryto, které se dělí na dvě části, nejbližší profily rozdělených částí u uzlu převezmou úroveň z posledního profilu hlavního toku před uzlem. Výhodou tohoto řešení je přesnost řešení, ovšem profily musí být v těsné blízkosti uzlu. Nevýhodou je nestabilita řešení.

Druhou variantou je energetická rovnice, která se používá v případě, kdy nejsou profily nejbližší uzlu v blízkosti. Poté nejde využít předpokladu stejných úrovní hladin v těchto profilech.



Obrázek 4.5 Uzel v programu HEC-RAS - Babiččino údolí

4.3 Dvourozměrné proudění v programu HEC-RAS

4.3.1 Základní předpoklady

I program HEC-RAS vychází ve svých výpočtech z Navier-Stokesových rovnic stejně jako program SMS. Tyto rovnice popisují pohyb kapaliny ve třech rozměrech. Program HEC-RAS je určen pro výpočet v mělkých vodách, kde nedochází k velké cirkulaci vody ve vertikálním směru. Vektory rychlosti v tomto směru můžeme pokládat za nulové a nadále počítat pouze s prouděním ve dvou horizontálních směrech. Dále program HEC-RAS počítá s nestlačitelností vody a používá konstantní hustotu kapaliny. Navier-Stokesovy rovnice jsou zjednodušeny a používají hodnotu turbulentní kinematické viskozity [7].

4.3.2 Hydraulické rovnice

4.3.2.1 Zákon zachování hmotnosti

Za předpokladu nestlačitelnosti kapaliny můžeme uvažovat následující rovnici:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (4.20)$$

Její vektorová forma [7]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (4.21)$$

kde $V = (u, v)$ je rychlostní vektor a diferenciální operátor ∇ je vektor operátorů parciální derivace $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$

Integrací normálovým vektorem n a užitím Gaussovy věty dostáváme integrální formu rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS + Q = 0 \quad (4.22)$$

Elementární objemový prvek Ω je základním elementem pro řešení numerickou metodu, v případě programu HEC-RAS metodu konečných objemů.

Dalším předpokladem při tvorbě modelu je zjednodušení povrchu. Povrch je ve skutečnosti velmi rozmanitý a jeho popis je velmi složitý. Povrch je třeba rozdělit do jednotlivých elementů tvořící síť. Element je potom základním prvkem pro výpočet numerickými metodami.

Obecnou rovnici zákona zachování hmotnosti lze pro element převést do následující rovnice:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k V_k \cdot n_k A_k(H) + Q = 0 \quad (4.23)$$

Objem elementu Ω lze zapsat ve tvaru $\Omega = P \cdot h$, obsah strany elementu $A_k = l_k \cdot h$.

4.3.2.2 Zákon zachování hybnosti

Jak již bylo dříve napsáno, vzhledem k předpokladu zanedbání proudění vody ve svislém směru lze obecné rovnice značně zjednodušit. Toto zjednodušení lze uplatnit pouze v mělkých vodách.

Dalším zjednodušením je Boussinesquovo zjednodušení a uvažování stejné hustoty kapaliny v celém objemu. Počítáme tak pouze s hydrostatickým tlakem. Dále se zanedbávají účinky vnější síly od větru působící na hladinu. Ze tří Navier-Stokesových momentových rovnic zůstanou jenom dvě, pro dva horizontální směry.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (4.25)$$

Rovnice lze zapsat i ve vektorové formě:

$$\begin{matrix} 1. & 2. & 3. & 4. & 5. & 6. \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + f k \times V \end{matrix} \quad (4.26)$$

Levá strana rovnice (členy 1.+2.) vyjadřuje prvky zrychlení. Pravá strana rovnice (členy 3.+4.+5.+6.) vyjadřuje vnitřní a vnější síly působící na kapalinu. Význam jednotlivých částí rovnice:

1. Prvek neustáleného proudění
2. Prvek konvektivního zrychlení
3. Prvek hydrostatického tlaku – tíha způsobí tlakový gradient, pokud není hladina horizontální
4. Prvek turbulentní kinematické viskozity – turbulentní proudy jsou na popis velmi složité, proto se zavádí koeficient kinematické viskozity v_t :

$$v_t = D h u_* \quad (4.27)$$

Kde u_* je třecí rychlost u dna:

$$u_* = \sqrt{gRS} \quad (4.28)$$

5. Prvek dnového tření – koeficient dnového tření je podle Chezyho rovnice vyjádřen:

$$c_f = \frac{g|V|}{C^2 R} \quad (4.29)$$

6. Coriolisův prvek – Coriolisův efekt je způsoben rotací Země kolem své osy. Účinek ve svislém směru je kvůli zjednodušení zanedbáván, v horizontálním směru ho lze spočítat:

$$f = 2\omega \sin\varphi \quad (4.30)$$

Při modelování Babiččina údolí byl tento prvek zanedbán. Účinek tohoto prvku je patrný pouze u velkých povodí. V případě modelování Babiččina údolí je rozměr oblasti v řádech kilometrů a nezpůsobuje žádný účinek. [7]

Program HEC-RAS využívá numerickou metodu konečných objemů. Uživatel může zvolit jeden ze dvou setů rovnic. Jedním z nich jsou momentové rovnice a druhým jsou reakčně difúzní rovnice, které lze použít pouze u koryt s malým podélným sklonem. Aproximace reakčně difúzními rovnicemi zřetelně zkrátí dobu výpočtu. Nejprve je vhodné na úseku modelu provést výpočet pomocí obou metod, momentových rovnic a reakčně difúzních rovnic. Pokud se hloubky vody a velikosti rychlostí liší minimálně, lze použít reakčně difúzní rovnice. Při zřetelně lišících se výsledcích je nutné použít výpočet Saint-Venantovými rovnicemi. Nevýhodou tohoto výpočtu je však dlouhá doba výpočtu.

Na následující stránce je popsán výpočet reakčně difúzními rovnicemi. Pohyb kapaliny je vyvolán působením zemské tíže a třením o dno. Rovnici (4.21) lze zjednodušit a výsledná reakčně difúzní rovnice je rovna:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (4.31)$$

$$\beta = \frac{(R(H))^{\frac{5}{3}}}{n|\nabla H|^{0.5}} \quad (4.32)$$

Obecnou rovnici potom můžeme pro element ve výpočetní síti převést do následující rovnice:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k \alpha \nabla H \cdot n + Q = 0 \quad (4.33)$$

$$\alpha(H) = \frac{(R(H))^{\frac{2}{3}} A_k(H)}{n|\nabla H|^{0.5}} \quad (4.34)$$

5 VYTVOŘENÍ MODELU

5.1 Postup při tvoření modelu v programu HEC-RAS

V manuálu k programu HEC-RAS *2D Modeling User's Manual* je stručný návod, kterým by se měl každý uživatel řídit při tvorbě matematického modelu. Návod je speciálně určen pro použití kombinace jednorozměrného a dvourozměrného přístupu modelování. [8]

- a) Nejprve je nutné vytvořit hladinu umístěnou ve správném souřadnicovém systému s terénem modelované oblasti.
- b) Dále se musí k vytvořenému terénu přiřadit odporové vlastnosti povrchu. Ty se přidávají v další hladině, která obsahuje polygony spojující plochy se stejným Manningovým součinitelem drsnosti.
- c) Je vhodné vložit mapový podklad ze kterého je jasné umístění objektů, které se musí v modelu vytvořit.
- d) Dále se vkládá geometrie pro část s jednorozměrným modelováním. Podle hranic příčných profilů (spojnice koncových bodů profilů) se vytvoří polygony pro dvourozměrné modelování.
- e) Dalším důležitým prvkem při tvorbě modelu je volba rozměrů elementu. Zde by měl řešitel zohlednit rozlohu a terénní složitost modelované oblasti a požadovanou přesnost řešení.
- f) Polygony jsou rozděleny na stejně velké obdélníkové elementy, které tvoří základ výpočtu pro dvourozměrné modelování. Je třeba vytvořit hraniční čáry (*breaklines*), které budou sloužit jako hranice mezi elementy. Zachytí se tím terénní hrany důležité pro správné zobrazení terénu.
- g) V dalším kroku se spojí jednotlivé polygony určené pro dvourozměrné modelování s prvky jednorozměrného modelování pomocí lineárních prvků.
- h) Po vytvoření geometrie modelu je nutné určit okrajové a počáteční podmínky.

Po splnění těchto kroků je model připraven na výpočet.

V dalším kroku se model kalibruje úpravou Manningova součinitele drsnosti, aby výsledky úrovní hladin odpovídaly reálně naměřeným hodnotám. Další variantou je tzv. citlivostní analýza, kde je výpočet modelování proveden pro různé hodnoty Manningova součinitele drsnosti. Tato varianta se používá, nemáme-li k dispozici naměřené hodnoty průtoků ve skutečnosti a pokud si nejsme jisti s určením hodnot Manningova součinitele drsnosti. Jelikož se v oblasti Babiččina údolí nevyskytla tak velká

povodeň, aby ověřila rozdělování průtoku v rozdělovacím objektu a při které by bylo možné naměřit úrovně hladin, bude pro modelovanou oblast provedena citlivostní analýza, a to jednak pro Manningovy součinitele drsnosti koryta, tak i pro součinitel přepadu na jezu ve Zlíči.

5.2 Geodetické podklady

Rozdílem při výběru geodetických dat oproti výběru při tvoření modelu do programu FESWMS, který jsem používal pro svou bakalářskou práci je zaměření koryta. Pro dvourozměrný model v programu FESWMS jsem použil zaměření koryta, kde byl příčný profil charakterizován pouze třemi body – osa koryta, levá a pravá pata břehu. Je velmi pravděpodobné, že by se zde mohla vyskytnout nepřesnost, protože tvar koryta je ve skutečnosti mnohem složitější.

Pro tvorbu modelu v programu HEC-RAS, kdy je koryto modelováno přístupem jednorozměrného matematického modelování, je k dispozici podrobné zaměření koryta v charakteristických příčných profilech modelovaného úseku. Dosáhne se tím tak lepší kvality a přesnosti výsledného modelu.

Jinak geodetické podklady zůstávají stejné jako při tvorbě modelu v programu FESWMS.

Nejdůležitější součástí modelu je model terénu. Při práci byl využit digitální model reliéfu (DMR) 5. generace. Ten poskytl velmi věrohodné zobrazení terénu. Jedinou nevýhodou DMR jsou vodní plochy. Terén pod vodními plochami není v tomto modelu terénu vyobrazen. Body digitálního modelu reliéfu 5. generace vystihují terénní nerovnosti a zlomy. Pomocí jednotlivých bodů lze vytvořit TIN síť (*triangular irregular network*), trojrozměrný model terénu, kde jsou sousední body spojeny úsečkami.

Digitální model reliéfu 5. generace je produktem ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální). Každý bod sítě je charakterizován polohopisnými souřadnicemi v systému S-JTSK (Křovákovo zobrazení) a výškopisnou souřadnicí H v systému Balt po vyrovnání (Bpv) [9].

Dalším důležitým materiálem jsou ortofoto snímky modelované oblasti. Ty byly použity pro určení oblastí se stejným součinitelem drsnosti povrchu a pro umístění objektů.

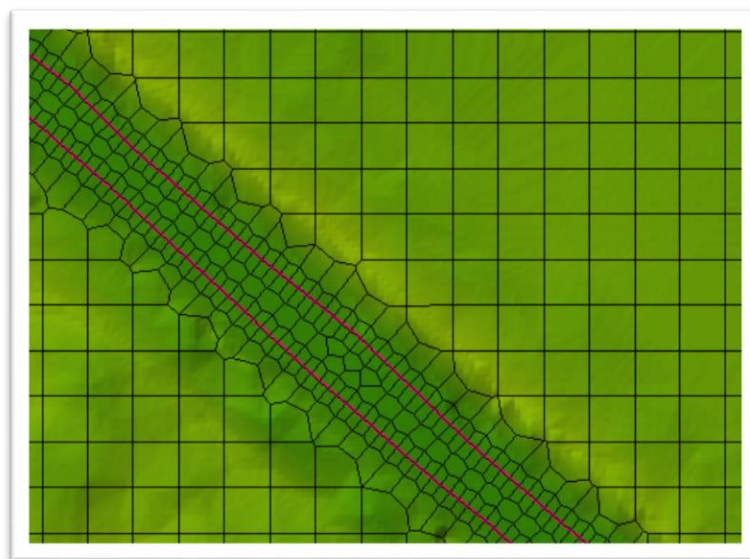
5.3 Výpočetní síť

5.3.1 Parametry výpočetní sítě v programu HEC-RAS

1D/2D model je tvořen dvěma částmi. Jednorozměrný model je tvořen příčnými profily a je rozdělen do třech částí. První z nich, koryto řeky Úpy před rozdělovacím objektem, je tvořena 35 profily. Celková délka úseku je 1479 m a neobsahuje žádné objekty. Druhou částí je koryto řeky Úpy pod rozdělovacím objektem včetně objektu jezu ve Zlíči. Tato část modelu obsahuje 29 příčných profilů s délkou úseku 1455 m. Třetí část modelu tvoří přivaděč. Kromě prahu na vtoku do přivaděče tato část obsahuje objekt silničního mostu ve Zlíči, ř. km 1,945, který výrazně ovlivňuje průtokové podmínky v přivaděči. Přivaděč je dlouhý 2337 m. Situace, geometrie příčných profilů a podélný profil jsou uvedeny v příloze jako výkresy.

Tři úseky (koryto řeky Úpy nad nátokem do přivaděče, koryto řeky Úpy pod nátokem do přivaděče a samotný přivaděč) jsou spojené pomocí uzlu v programu HEC-RAS.

Dvourozměrná síť se nachází v pravobřežní inundaci a obsahuje inundační přeliv. Celá síť je tvořena stejně velkými čtvercovými elementy. Výjimku tvoří oblasti kolem *breaklines*, což jsou liniové prvky tvořící hranici sítě a zároveň je lze použít jako jednu ze stran buněk. U každé *breakline* můžeme určit rozměr buněk, které s ní sousedí, a jejich rozměr tak může být jiný než rozměr čtvercových buněk. Toho se dá využít chceme-li mít např. u vyvýšené komunikace (Obrázek 5.1) detailnější popis geometrie a rozměr tak zvolíme menší. Dvourozměrná část modelu obsahuje 56 266 elementů. Rozměr čtvercového elementu je 4 m, u *breaklines* je rozměr buňky maximálně 2 m.



Obrázek 5.1 2D síť v programu HEC-RAS

Přechod mezi dvěma částmi modelu je tvořen *tzv. lateral structures*. Jedná se o liniové prvky spojující obě části modelu. Přechod může být počítán jednak řídicími rovnicemi pro výpočet dvourozměrného proudění nebo rovnicí přepadu. Pro tuto práci byla zvolen výpočet řídicími rovnicemi, s ohlednutím na fakt, že se přeliv nemusí chovat jako jez. V programu se také zadává počet iterací u jednotlivých výpočtů. S každou další iterací je výsledek přesnější, zároveň však představuje i delší dobu výpočtu.

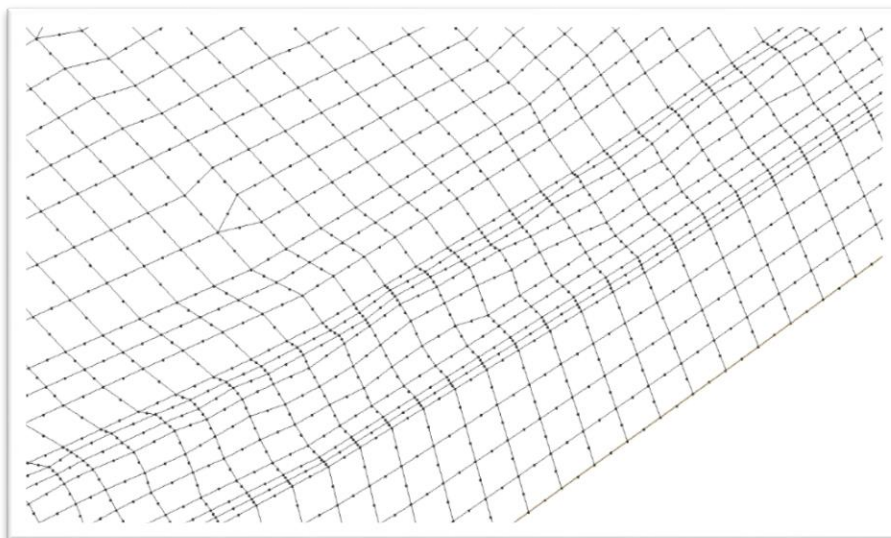
5.3.2 Parametry výpočetní sítě v programu SMS

Program SMS s modulem FESWMS provádí výpočet metodou konečných prvků na rozdíl od programu HEC-RAS, který používá numerickou metodu konečných objemů.

Rozdíl je hlavně při řešení jednotlivých buněk. Program HEC-RAS vytvoří pro každou buňku vztah mezi objemem buňky v závislosti na nadmořské výšce. Na rozdíl od programu FESWMS je možné částečné zatopení buňky. Lze tak používat větší rozměry elementů a celkový čas výpočtu je vzhledem k menším nárokům na výpočetní techniku kratší. Pokud byl jediný výpočetní bod v buňce u modelu FESWMS suchý, celý element byl odejmut z výpočtů. Výsledky z programu HEC-RAS tak lze považovat za přesnější.

Výpočetní síť v programu FESWMS je tvořena obdélníkovými a trojúhelníkovými elementy, z nichž každý má 8 (obdélník) a 6 (trojúhelník) výpočetních bodů. Jak je patrné z *Obrázku 5.2*, hranice elementů kopíruje terénní nerovnosti, což navyšuje celkovou přesnost. V inundačním území byl rozměr elementu vždy menší než 5 m, v korytě v příčném směru menší než 1 m. Celkově měla výpočetní síť 127 141 výpočetních bodů a 42 771 elementů.

Výsledkem výpočtu je hloubka vody a vektor rychlosti pro každý výpočetní bod sítě. Samotný výpočet je určován řídicími rovnicemi (rovnice kontinuity a rovnice hybnosti).



Obrázek 5.2 Ukázka výpočetní sítě v programu SMS [2]

5.3.3 Určení odporu povrchu

Jedním z hlavních parametrů, které se musí při sestavení modelu určit je Manningův součinitel drsnosti n . Jedná se o empiricky určený součinitel s jednotkou $[m^{1/6}]$. Pro jeho určení je k dispozici několik variant. Nejjednodušší je výběr součinitele pomocí tabulek. Pro různé typy povrchu jsou uvedeny hodnoty Manningova drsnostního součinitele. Další variantou je fotografická metoda, kdy se porovnávají fotografie zobrazující povrchy s určenou hodnotou součinitele drsnosti a vybírá se ta nejvíce podobná řešené oblasti. Tuto metodu je dobré používat zejména pro lesní porost a koryta toků, kde je obtížné určit odpor povrchu na základě popisu materiálu. U fotografické metody lze velmi dobře vystihnout vzdálenost a tloušťku kmenů a celkový charakteristiku lesního porostu. To samé platí i u koryt. Ještě vhodněji se pro určení Manningova součinitele drsnosti u koryt jeví použití Cowanovy metody, která je založena na šesti faktorech (materiál dna koryta, nerovnost povrchu, četnost změn profilu, vliv překážek, vliv vegetace a korelační faktor zohledňující meandrování koryta).

I tak lze říct, že určení Manningova součinitele drsnosti je především u otevřených koryt velmi složitá záležitost. Po získání prvotních výsledků se jeho hodnota nadále upravuje při kalibraci modelu.

Dalším problematikou je variace Manningova součinitele drsnosti během ročních dob. Zatímco při jarních povodních jsou stromy a keře holé, traviny jsou slehlé a hodnoty Manningova součinitele jsou tak menší, při letních povodních je situace opačná. Stromy a keře jsou obaleny listím a tráva je velmi vysoká.

Příkladem této problematiky jsou výsledky výzkumu provedeného v 20. letech 20. století univerzitou v Illinois. Na melioračním kanálu byly měřeny hodnoty Manningova rychlostního součinitele během celého roku. V březnu byla naměřena hodnota $0,033 \text{ m}^{1/6}$. Po jarním zarůstání vrbami a býlím byla v dubnu naměřena hodnota $0,055 \text{ m}^{1/6}$. Během léta došlo k zarůstání orobincem a hodnota se vyšplhala až na hodnotu $0,115 \text{ m}^{1/6}$. Po srpnové povodni, kdy byl orobince vypláchnut byla naměřena hodnota $0,072 \text{ m}^{1/6}$. Z tohoto příkladu je patrné, jak moc se může součinitel drsnosti během různých vegetačních období měnit. Oblast koryta a inundačního území v Babiččině údolí nepodléhá tak razantní změně vegetace jako výše zmíněný meliorační kanál, i tak se zcela jistě parametr během ročního období mění. [10] [11]

5.3.3.1 Určení odporu povrchu koryta řeky Úpě

V bakalářské práci Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích byly zvoleny hodnoty Manningova součinitel drsnosti pro dno koryta řeky $n = 0,035 \text{ m}^{1/6}$ a pro svahy koryta $n = 0,055 \text{ m}^{1/6}$ [2]. Hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro tvorbu jednorozměrného modelu by měli být vždy větší, jelikož je v něm zahrnut i vliv turbulence, který je v případě dvourozměrného modelování obsažen ve členu turbulence u Saint-Venantových rovnic.

5.3.3.2 Určení odporu povrchu Úpského přivaděče

Při hydraulických výpočtech při navrhování přivaděče byla uvažována hodnota Manningova součinitele drsnosti $n = 0,025 - 0,030 \text{ m}^{1/6}$. Pro výpočet v programu SMS byla použita jednotná hodnota $n = 0,025 \text{ m}^{1/6}$. Diplomová práce se zabývá i vlivem změny hodnoty tohoto parametru. Jako nejpravděpodobnější se jeví pro použití u jednorozměrného matematického modelu hodnota $n = 0,030 \text{ m}^{1/6}$, avšak nelze přesně odhadnout, v jakém stavu bude travní porost ve vrchních částech přivaděče při výskytu povodně.

5.3.3.3 Určení odporu povrchu pro oblast inundace

TYP MATERIÁLU	TYP URČENÍ MANNINGOVA SOUČINITELE DRSNOSTI	MANNINGŮV SOUČINTEL DRSNOSTI $n [m^{1/6}]$
Asfalt	Podle hydraulických tabulek	0,016
Beton	Podle hydraulických tabulek	0,015
Kamenná dlažba	Podle hydraulických tabulek	0,025
Křoviny	Podle hydraulických tabulek	0,100
Les	Fotografická metoda	0,100
Louka	Podle hydraulických tabulek	0,040
Štěrky	Podle hydraulických tabulek	0,020
Tráva	Podle hydraulických tabulek	0,025
Vysekané křoví	Podle hydraulických tabulek	0,040

Tabulka 5.1 Hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro materiály na území inundace

Názorná ukázka určení Manningova součinitele drsnosti pomocí fotografické metody:



Obrázek 5.3 Fotografie inundačního území s určenou hodnotou Manningova součinitele drsnosti podle katalogu lesních porostů [12]



Obrázek 5.4 Fotografie inundačního území Babiččina údolí [2]

5.4 Počáteční a okrajové podmínky

5.4.1 1D/2D model

Okrajové podmínky byly pro model v programu HEC-RAS zvoleny zcela stejné, jako u bakalářské práce *Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích*, aby bylo možné ověřit podobnost obou výpočtů. V horním profilu modelované oblasti na řece Úpě, ř. km 16,300, byla zvolena hodnota průtoku. Cílem práce je ověřit rozdělení při povodňovém průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v rozdělovacím objektu. Program HEC-RAS řeší neustálené proudění vody. Proto je důležité nechat průtok ustálit na hodnotě povodňového průtoku, aby byl výpočet relevantní a bylo ho možné porovnat s výsledky z bakalářské práce, kde byl model řešen ustáleným stavem. Pro oba výpočty je profil ř. km 16,300 jediným profilem, kudy do modelu přitéká voda. V oblasti nebylo uvažováno s dalšími přítoky (potok Olešnice se do řeky vlévá pod jezem ve Zlíči a neovlivňuje rozdělení průtoku v rozdělovacím průtoku). Dále nebylo uvažováno ani se srážkovým úhrnem vztaženým k ploše modelované oblasti.

První dolní okrajová podmínka leží na řece Úpě, ř. km 13,358. Zde nebyla vložena úroveň hladiny, ale sklon čáry energie v místě tohoto profilu. Hodnota sklonu 0,001 [-] byla převzata z výsledků jednorozměrného matematického modelu. Tento profil je v dostatečné

vzdálenosti od rozdělovacího objektu, a menší tohoto parametru neovlivní hydraulickou situaci na rozdělovacím objektu.

Druhá dolní okrajová podmínka se nachází na Úpském přivaděči ř. km 0,030 těsně před vyústěním přivaděče do severní části vodní nádrže Rozkoš. Z manipulačního řádu je patrné, že proudění vody v přivaděči může být v tomto profilu ovlivněno při určité úrovni hladiny vody v severní nádrži. V bakalářské práci byly řešeny dva stavy. Proudění vody v přivaděči v prvním případě není ovlivněno hladinou vody v severní nádrži (kóta hladiny v severní nádrži na úrovni 280,50 m n. m. – kóta stálého nadržení). Pro tento stav byla určena úroveň hladiny na konci přivaděče na kótu 282,05 m n. m. Výsledky byly převzaty z jednorozměrného matematického modelování. Při druhém stavu je proudění v přivaděči ovlivněno úrovní hladiny vody v severní nádrži. V tomto případě, kdy je hladina v severní nádrži na kótě 282,60 m n. m. (kóta naplnění ovladatelného ochranného prostoru nádrže), je uvažováno s úrovní hladiny na konci přivaděče na kótě 282,60 m n. m.

5.5 Verifikace modelu

Model rozdělovacího objektu v Ratibořicích nemůže být verifikován, jelikož se od rekonstrukce objektu v roce 2007 nevyskytla tak velká povodeň, aby ověřila funkčnost objektu a která by určila hodnoty hladin pro verifikaci a kalibraci modelu.

Vzhledem k faktu, že verifikace není možná, bude provedena citlivostní analýza, během které bude provedeno několik výpočtů s různými hodnotami Manningova drsnostního součinitele a její následné vyhodnocení. Kromě odporu povrchu je nejasný také součinitel přepadu na jezu ve Zlíči. I pro jeho hodnotu byla u variant se vztyčenou klapkou provedena citlivostní analýza.

Výskyt povodně lze očekávat jak v zimním, tak v letním období. Řeka Úpa je známa jako velmi dravá a silná řeka při jarním tání. Odvodňuje většinu území východních Krkonoš. V roce 2013 přišla povodeň na v prvních dnech měsíce června. Hodnoty Manningova součinitele drsnosti se mohou při jednotlivých povodních lišit.

5.6 Prezentace výsledků

Výsledky modelování lze kromě určení rozdělení povodňového průtoku mezi jednotlivé části rozdělovacího objektu prezentovat v několika formách. Část modelu s jednorozměrným prouděním lze prezentovat podélným profilem a geometrií příčných profilů s vyznačenými hladinami. Program HEC-RAS umožňuje vytváření tzv. tematických map, kde jsou v celé modelované oblasti (1D i 2D) graficky zobrazeny úrovně hladiny popř. rychlosti proudění pro jednotlivé elementy. Tyto podklady lze vyexportovat a následně upravovat např. v programu ArcGIS. V něm lze pod tento podklad vložit ortofoto snímky a umístit ho do měřítka.

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hydraulická studie pro rozdělovací objekt na řece Úpě v Ratibořicích byla řešena obdobně jako bakalářská práce Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích [2] pro stejný povodňový průtok Q_{100} na řece Úpě s hodnotou $256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Vzhledem k možnosti plnění nádrže a tím i ovlivňování proudění vody v přivaděči byl výpočet řešen pro dva stavy. Jeden (Varianta I.), kdy hladina vody v nádrži neovlivňuje proudění vody v přivaděči a druhý (Varianta II.), kdy je nádrž naplněna na kótu ochranného ovladatelného prostoru a tato hladina ovlivňuje proudění vody v přivaděči a průtok přivaděčem je ve směru k vodní nádrži menší. Oba případy jsou řešeny pro plně vztyčený ocelový klapkový uzávěr na jezu ve Zlíči na kótu 282,95 m n. m, kdy je zajištěn maximální průtok přivaděčem směrem do nádrže.

Zároveň byla řešena varianta pro stav sklopeného klapkového uzávěru na jezu ve Zlíči (Varianta III.), který by nastal v případě naplnění ochranného ovladatelného prostoru vodní nádrže Rozkoš. Při tomto stavu je snaha nepouštět žádné další průtočné množství přivaděčem do nádrže Rozkoš tak, aby vše zůstalo v korytě řeky Úpy.

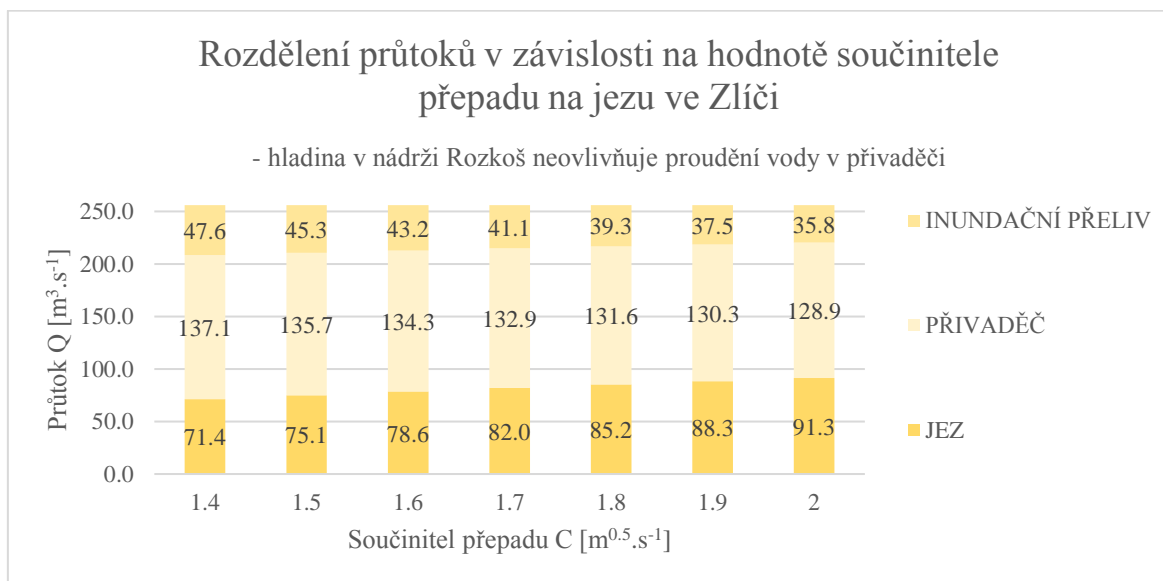
Jelikož nejsou k dispozici zaměřené hodnoty hladin z reálné povodně, byla pro modelovanou oblast provedena citlivostní analýza. V modelu jsou tři parametry, jejichž hodnoty lze měnit. Prvním z nich jsou hodnoty Manningova součinitele drsnosti. V citlivostní analýze se bude měnit hodnota součinitele pro dno a svahy koryta a dále potom pro povrch Úpského přivaděče. Druhým parametrem je součinitel přepadu na jezu ve Zlíči. I zde se budou jeho parametry měnit u Varianty I. a Varianty II.

6.1 Varianta I.

Varianta I. řeší stav rozdělovacího objektu při průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, s plně vztyčenou klapkou na jezu ve Zlíči na kótu 282,95 m n. m. a úrovni hladiny vody v nádrži Rozkoš, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči.

Citlivostní analýza byla provedena pro následující tři parametry:

1) Součinitel přepadu jezu ve Zlíči



Obrázek 6.1 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě součinitele přepadu na jezu ve Zlíči - Varianta I.

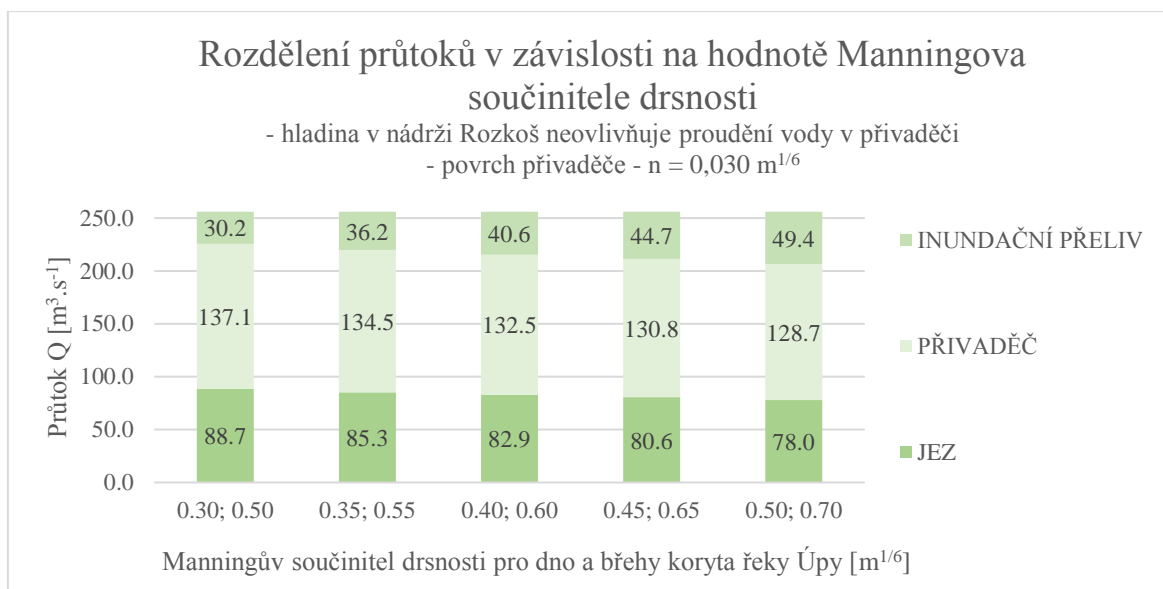
Z Obrázku 6.1 je patrné rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu mezi inundační přeliv, Úpský přivaděč a jez ve Zlíči v závislosti na hodnotě součinitele přepadu na jezu ve Zlíči při neovlivněném proudění v Úpském přivaděči.

Citlivostní analýza pro tento parametr byla provedena pro hodnoty Manningova součinitele drsnosti n :

- Dno koryta řeky Úpy – $n = 0,040 \text{ m}^{1/6}$
- Břehy koryta řeky Úpy – $n = 0,060 \text{ m}^{1/6}$
- Povrch Úpského přivaděče – $n = 0,030 \text{ m}^{1/6}$

2) Manningův součinitel drsnosti pro dno a břehy koryta řeky Úpy

Podle návrhových předpokladů by mělo docházet k průtoku přes jezové těleso $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s vodním sloupcem nad jezem $h = 1,75 \text{ m}$. Po dosazení těchto dvou hodnot do přepadové rovnice vzejde hodnota uvažovaného součinitele přepadu $C = 1,73 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnota tohoto součinitele bude uvažována pro řešení citlivostní analýzy zaměřené na různé hodnoty drsnosti koryta řeky Úpy.

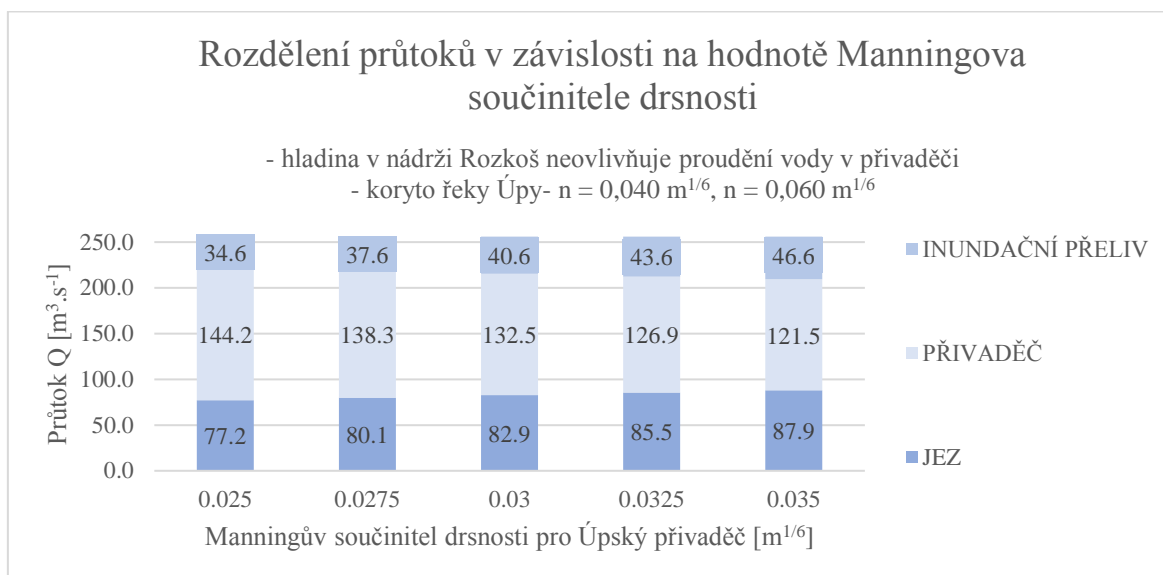


Obrázek 6.2 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti - Varianta I.

Z Obrázku 6.2 je patrné rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu mezi inundační přeliv, Úpský přivaděč a jez ve Zlíči v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti koryta řeky Úpy při neovlivněném proudění v Úpském přivaděči.

3) Manningův součinitel drsnosti Úpského přivaděče

I pro analýzu součinitele drsnosti povrchu Úpského přivaděče byla uvažována hodnota součinitele přepadu na jezu ve Zlíči $C = 1,73 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 6.3 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti – přivaděč – Varianta I.

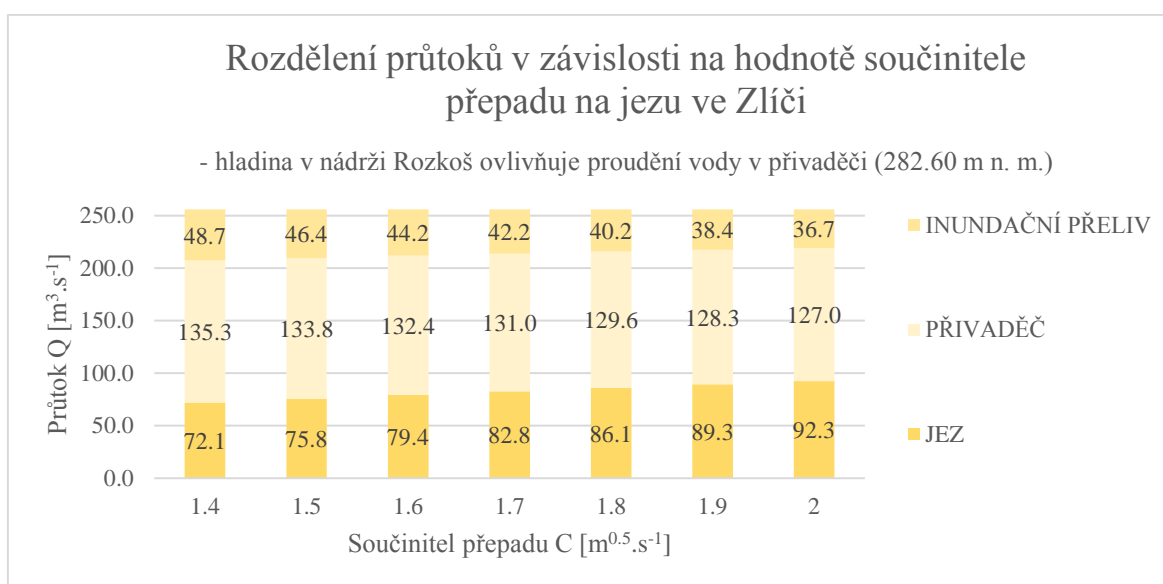
Hodnota součinitele drsnosti povrchu Úpského přivaděče má na rozdělení průtoku velký vliv. Nejpravděpodobnější se jeví použití hodnoty $0,030 \text{ m}^{1/6}$. Ze všech variant s různými hodnotami součinitele je patrné, že přivaděčem neproudí požadované množství $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ podle návrhu.

6.2 Varianta II.

Varianta II. řeší stav rozdělovacího objektu při průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, s plně vztyčenou klapkou na jezu ve Zlíči na kótu 282,95 m n. m. a úrovni hladiny vody v nádrži Rozkoš na kótě 282,60 m n. m., která ovlivňuje proudění vody v přivaděči.

Citlivostní analýza byla stejně jako pro Variantu I. provedena pro následující tři parametry:

1) Součinitel přepadu jezu ve Zlíči



Obrázek 6.4 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě součinitele přepadu na jezu ve Zlíči - Varianta II.

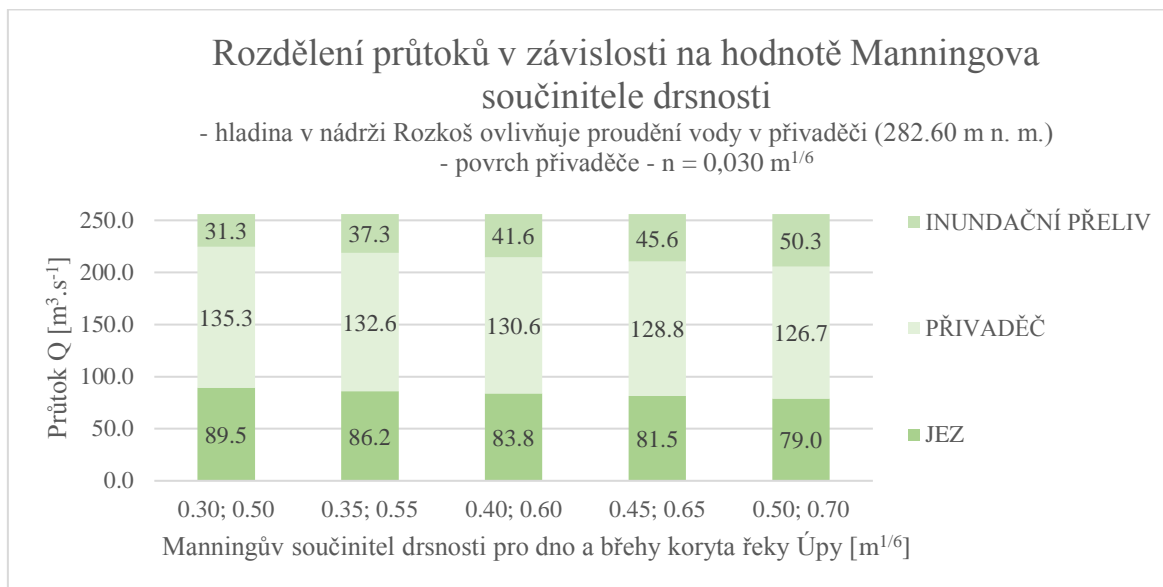
Z Obrázku 6.4 je patrné rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu mezi inundační přeliv, Úpský přivaděč a jez ve Zlíči v závislosti na hodnotě součinitele přepadu na jezu ve Zlíči při ovlivněném proudění v Úpském přivaděči úrovni hladiny v Rozkošské nádrži.

Citlivostní analýza byla provedena pro hodnoty Manningova součinitele drsnosti n :

- Dno koryta řeky Úpy – $n = 0,040 \text{ m}^{1/6}$
- Břehy koryta řeky Úpy – $n = 0,060 \text{ m}^{1/6}$
- Povrch Úpského přivaděče – $n = 0,030 \text{ m}^{1/6}$

2) Manningův součinitel drsnosti pro dno a břehy koryta řeky Úpy

Pro analýzu součinitele drsnosti pro dno a břehy koryta řeky Úpy byla uvažována hodnota součinitele přepadu na jezu ve Zlíči $C = 1,73 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$.

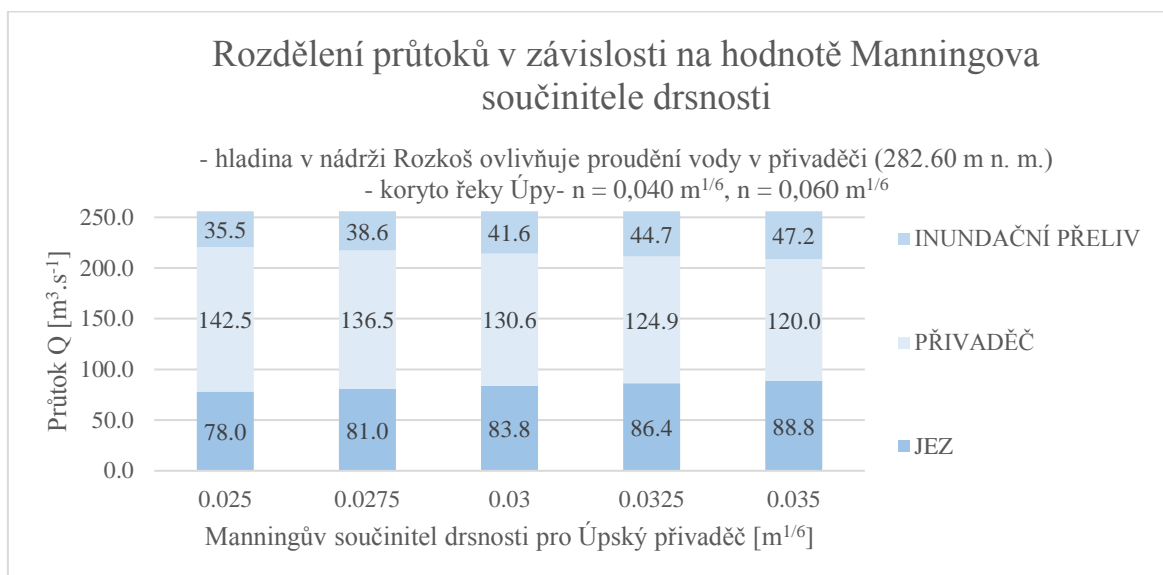


Obrázek 6.5 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti - Varianta II.

Z Obrázku 6.5 je patrné rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu mezi inundační přeliv, Úpský přivaděč a jez ve Zlíči v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti koryta řeky Úpy při ovlivněném proudění v Úpském přivaděči úrovni hladiny v Rozkošské nádrži. Hodnota součinitele přepadu na jezu ve Zlíči je pro všechny případy $1,73 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$.

3) Manningův součinitel drsnosti povrchu Úpského přivaděče

I pro analýzu součinitele drsnosti povrchu Úpského přivaděče ve Variantě II. byla uvažována hodnota součinitele přepadu na Jezu ve Zlíči $C = 1,73 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$.



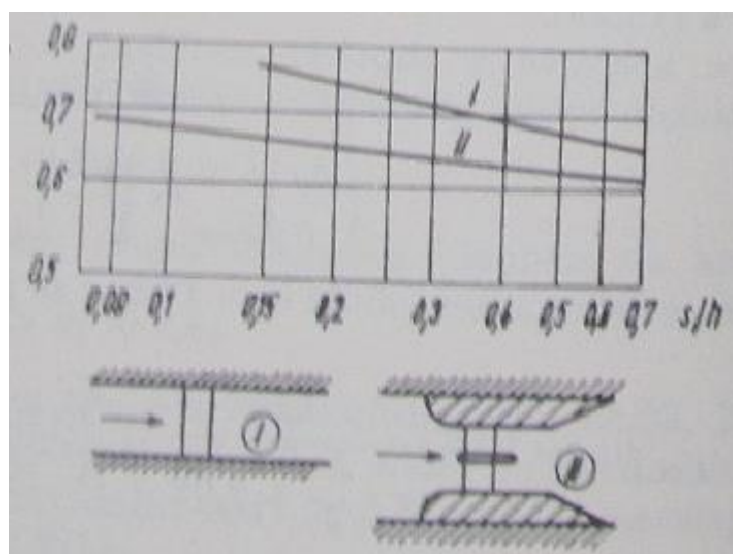
Obrázek 6.6 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti – přivaděč – Varianta II.

Stejně jako u Varianty I. je patrné, že přivaděčem ani u jedné z možných hodnot součinitele drsnosti nebude proudit požadované průtočné množství $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnota součinitele drsnosti povrchu Úpského přivaděče má na rozdělení průtoků velký vliv.

6.3 Varianta III.

Varianta III. řeší stav rozdělovacího objektu při průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, při naplněném ochranném ovladatelném prostoru vodní nádrže Rozkoš a položené klapce na jezu ve Zlíči, kdy je snahou nepřivádět žádné další průtočné množství přivaděčem směrem do nádrže.

Při položené klapce proudí voda přes Jamborův práh. Ten je charakterizován vysokým součinitelem přepadu. Pro jeho určení byla použita publikace [13], kde je součinitel přepadu určen na základě poměru výšky prahu a hloubky vody nad prahem.



Obrázek 6.7 Součinitel přepadu pro Jamborův práh [13]

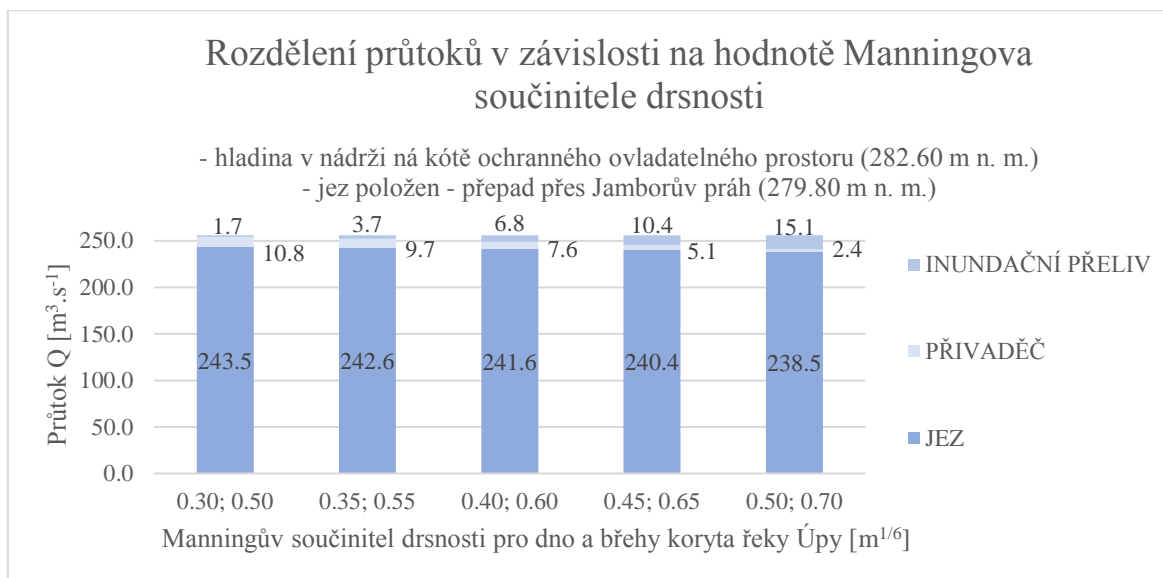
Parametr h je výška vodního sloupce nad prahem v nadjezí a s je výška prahu v nadjezí. Výška prahu u jezu ve Zlíči je 0,8 m. Po prvních výpočtech byla vypočtena hloubka vody v nadjezí 2,8 m. Proto je poměr s/h roven hodnotě 0,29. Typ Jamborova prahu patří do kategorie I. Proto je výsledná hodnota součinitele přepadu $\mu_p = 0,71$ [-].

Součinitel vychází z přepadové rovnice:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_p \sqrt{2g} L h^{1.5} \quad (6.1)$$

Proto je nutné tento součinitel přepočítat pro koeficient C , z kterého vychází přepadová rovnice v programu HEC-RAS.

$$C = \frac{2}{3} \mu_p \sqrt{2g} = \frac{2}{3} 0.71 \sqrt{19.62} = 2.10 \text{ m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.2)$$



Obrázek 6.8 Rozdělení průtoků v závislosti na hodnotě Manningova součinitele drsnosti - Varianta III.

Z Obrázku 6.8 vyplývá, že pro všechny varianty hodnot součinitele drsnosti dochází nadále k mírnému plnění nádrže. Žádná z variant však nepřekročí hodnotu neškodného odtoku z nádrže $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a tak lze situaci, kdy by byla doba povodně delší než navrhovaná, brát za bezpečnou.

Vzhledem k velmi malému rozdílu mezi hladinou v nadjezí a hladinou v nádrži nemá změna součinitele drsnosti povrchu přivaděče u Varianty III. téměř žádný vliv, a proto nebyla pro tento parametr provedena citlivostní analýza.

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKU S VÝSLEDKY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

7.1 Uživatelský dojem

Provedení výpočtů v programu HEC-RAS je uživatelsky velmi příjemné. Výhoda oproti programu SMS s modulem FESWMS spočívá v možnosti vložení tachymetricky zaměřených příčných řezů do geometrie modelu a jejich následná interpolace po délce staničení. Spojnice příčných profilů v korytě jsou tak vyhlazené a nedochází k velkým zlomům jako v programu SMS. Toto řešení je tedy přesnější. Umožňuje vložení celé, mnohdy velmi složitěho příčného profilu, a to dává celému modelu větší přesnost při tvorbě geometrie. Bohužel nemohl být tento způsob vytváření terénu pod vodní plochou při tvorbě modelu využit, protože nebylo k dispozici dostatečné množství příčných profilů. Interpolace dostupných příčných profilů vedla k velké nepřesnosti a došlo k velkým nepřesnostem mezi hranicí geometrie koryta a hranice digitálního modelu reliéfu (DMR 5G).

Pro tvorbu matematického modelu je zapotřebí ovládat anglický jazyk na dobré úrovni. Ani jeden program nemá české uživatelské prostředí a nejsou k dispozici ani české manuály.

Program HEC-RAS má určitě větší uživatelskou základnu. Zkušenosti uživatelů jsou ve velkém počtu popsány v internetových diskuzích a při sestavování modelu lze tyto zkušenosti využít. Práce je potom pro uživatele o hodně jednodušší.

Výsledky z obou programů lze převést do programu ArcGIS a následně je upravovat pro grafickou prezentaci. Výstupem modelování jsou pro oba případy tematické mapy, zobrazující úrovně hladin jednotlivých elementů na mapovém podkladu. Kromě úrovně hladin programy nabízí zobrazení dalších parametrů, např. hloubka vody, rychlost proudění, rychlostní vektory atd.

7.2 Porovnání výsledků

V následující kapitole jsou uvedeny porovnání výsledků výpočtů z bakalářské práce [2], které byly provedeny v programu FESWMS využívající dvourozměrné matematické modelování s výsledky výpočtů z programu HEC-RAS využívající kombinaci jednorozměrného a dvourozměrného matematického modelování.

Velkým rozdílem výpočtu v obou programech je řešení objektů. V programu FESWMS bylo velmi složité vkládání objektů do modelované oblasti. Jezové těleso bylo řešeno momentovou rovnicí, a nikoliv jako v případě programu HEC-RAS přepadovou

rovnici určením součinitele přepadu. Další odlišností bylo řešení mostní konstrukce na přivaděči, která byla v programu FESWMS řešena pouze zúžením koryta v místě konstrukce a detailnější geometrie koryta, která byla tachymetricky zaměřena a nebyla řešeno zjednodušeně 3D liniemi pat břehů. Z těchto důvodů je pochopitelné, že výsledky u obou typů modelů se mohou lišit.

Pro porovnání obou metod bylo použito řešení s drsnostním součinitelem pro dno koryta $0,040 \text{ m}^{1/6}$, břehy koryta $0,060 \text{ m}^{1/6}$ a povrch Úpského přivaděče $0,030 \text{ m}^{1/6}$. Součinitel přepadu na jezu ve Zlíči byl zvolen $1,73 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$ ve variantách I. a II.

V bakalářská práci [2], při použití dvourozměrného modelovacího přístupu, byly zvoleny hodnoty součinitele drsnosti následovně:

- dno koryta $n = 0,035 \text{ m}^{1/6}$
- břehy koryta $n = 0,055 \text{ m}^{1/6}$
- povrch Úpského přivaděče $n = 0,025 \text{ m}^{1/6}$

V diplomové práci byly záměrně použity vyšší hodnoty součinitele drsnosti, protože rovnice pro dvourozměrné modelování obsahují zvlášť člen turbulence.

7.2.1 Varianta I.

Varianta I. řeší stav s plně vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m a s hladinou vody v nádrži, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči.

	FESWMS	HEC-RAS	Rozdíl	Rozdíl
Objekt	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	[%]
Jez ve Zlíči	86	83	3	3
Přivaděč	127	132	-5	4
Inundační přeliv	43	41	2	5

Tabulka 7.1 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu - Varianta I.

Rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou znatelné. Řešení v programu HEC-RAS se více přibližuje návrhovým hodnotám pro rozdělovací objekt (jez ve Zlíči – $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, přivaděč – $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, inundační přeliv – $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Pro obě varianty platí, že pravostrannou inundací proudí při povodňové situaci více vody, než se předpokládalo a Úpským přivaděčem neproudí požadované množství vody. V korytě řeky Úpy zůstává větší část průtoku, což může vést k větším materiálním škodám v zastavěných oblastech kolem řeky Úpy v úseku pod jezem ve Zlíči.

7.2.2 Varianta II.

Varianta II. řeší stav s plně vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m a s hladinou vody v nádrži, která ovlivňuje proudění vody v přivaděči.

	FESWMS	HEC-RAS	Rozdíl	Rozdíl
Objekt	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[%]
Jez ve Zlíči	87	84	3	3
Přivaděč	125	130	-5	4
Inundační přeliv	44	42	2	5

Tabulka 7.2 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu - Varianta II.

Z výsledků u Variant I. a II. je patrné, že jsou velmi podobné. Ovlivnění funkce rozdělovacího objektu hladinou vody v nádrži je minimální. Průtočné množství v přivaděči je pro obě varianty výpočtů menší pouze o 2 m³.s⁻¹.

7.2.3 Varianta III.

Varianta III. řeší stav s položenou klapkou a s hladinou vody v nádrži na kótě ochranného ovladatelného retenčního prostoru.

	FESWMS	HEC-RAS	Rozdíl	Rozdíl
Objekt	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[%]
Jez ve Zlíči	206	242	-36	17
Přivaděč	31	8	23	75
Inundační přeliv	19	7	12	64

Tabulka 7.3 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu – Varianta III.

Výsledky u Varianty III. vykazují největší rozdíly. V případě programu FESWMS bylo nutné počítat s poměrně velkým prouděním v přivaděči i při sklopené klapce, což by vzhledem k neškodnému vypouštění nádrže (10 m³.s⁻¹) mohlo způsobit další plnění nádrže. Výsledky v programu HEC-RAS však odhalily, že v korytě řeky Úpy zůstává takřka veškerý průtok a přivaděčem proudí jen 8 m³.s⁻¹. Přítok do nádrže je tedy menší než odtok z nádrže. I v případě delšího trvání povodňového stavu nedojde ke vzniku havarijní situace na vodním díle Rozkoš. Přehradní těleso nemá bezpečnostní přeliv, ale vzhledem k faktu, že lze z nádrže odebírat větší množství vody, než do ní přitéká, nebude přehradní těleso ohroženo.

8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit matematický model v programu HEC-RAS, kombinující jednorozměrný a dvourozměrný přístup modelování proudění vody a porovnat výsledky modelování s výsledky dvourozměrného matematického modelování v programu SMS s modulem FESWMS.

Výsledné rozdělení průtoků je u obou typů modelů odlišný. Rozdíl přisuzuji zpřesnění geometrie koryta, která byla v případě modelování v programu SMS řešena velmi zjednodušeně břehovými liniemi, a nikoliv pomocí tachymetricky zaměřených příčných řezů, jako tomu bylo u modelu v programu HEC-RAS. Dalším velmi důležitým rozdílem je řešení objektů na toku. Program SMS neumožňuje používat přepadové rovnice pro jezová tělesa. Největší odlišnost mezi jednotlivými metodami nastává u varianty řešení s položeným klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči. V programu HEC-RAS je tento jev řešen jako přepad přes těleso Jamborova prahu, který je charakterizován vysokým součinitelem přepadu. Proto je průtok jezem větší než v případě dvourozměrného modelování v programu SMS. Další nevýhodou programu SMS je absence modelování mostů.

Program SMS s modulem FESWMS používá při svých výpočtech numerickou metodu konečných prvků. Problém nastává u elementů, v nichž je alespoň jeden výpočetní bod s nulovou hloubkou vody. V tomto případě je celý element označen za suchý a nadále není zahrnut do výpočtů. Pokud je tedy rozměr elementu zvolen příliš velký, může při pouze částečném zatopení elementů a jejich vyřazení z výpočtů docházet k zmenšení průtočného profilu.

Babiččino údolí je velmi složitou oblastí na vytváření modelu. Jako zcela nevhodné se jeví použití pouze jednorozměrného matematického modelu vzhledem k rozsáhlému inundačnímu území. Dvourozměrný matematický model se jeví jako lepší varianta, ovšem problém nastává při řešení objektů na toku. Proto za nejvhodnější variantu lze považovat právě kombinaci jednorozměrného a dvourozměrného matematického modelování, kdy je inundační území řešeno dvourozměrným a koryto s objekty jednorozměrným přístupem.

Dalším problematikou je volba hodnot Manningova součinitele drsnosti. Hodnoty součinitele lze velmi obtížně určit. Mění se během jednotlivých ročních dob, a proto byla pro řešení problému zvolena citlivostní analýza, kdy jsou výpočty provedeny pro různé hodnoty součinitele drsnosti, z kterých je patrné, jak se změna tohoto parametru projevuje na celkovém rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu. Dalším námětem na rozšíření

dosavadních výsledků je tedy detailnější zkoumání odporu povrchů v modelované oblasti během různých ročních dob. Výsledkem by bylo rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu při jarních a letních povodních, kdy je stav vegetace rozdílný.

Využití matematického modelu pro oblast Babiččina údolí je značně omezené. Během povodňového stavu dochází k manipulaci s klapkovým uzávěrem na jezu ve Zlíči podle velikosti průtoku a v závislosti na plnění nádrže. Žádný model zatím neumožňuje zadávat kóty jezu v závislosti na čase. Proto bych pro další stupeň modelování rozdělovacího objektu v Ratibořicích doporučil fyzikální model, kde by bylo možné s uzávěrem libovolně manipulovat. Řešení této práce a práce *Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích* [2] byly založené na průběhu návrhového povodňového průtoku danou oblastí a nezaměřovaly se na průběh povodňové vlny, které by bylo možné řešit právě sestavením fyzikálního modelu.

9 LITERATURA

- [1] POVODÍ LABE, státní podnik. Manipulační řád pro vodní dílo Rozkoš. 06/2007 revize 12/2012.
- [2] ERNEST, Vilém. Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích. Praha, 2016. Bakalářská práce (Bc.). ČVUT, Fakulta stavební, katedra hydrauliky.
- [3] KUBÁT, Jan a DAŇHELKA, Jan. Vyhodnocení povodní v červnu 2013 [online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: http://voda.chmi.cz/pov13/DilciZprava_DU_3_1_cast1-VyznamnaVD-final.pdf
- [4] POVODÍ LABE, státní podnik. Projektová dokumentace pro územní řízení VD Rozkoš – zvýšení ochranné funkce nádrže. 04/2004.
- [5] HAVLÍK, Vladimír aj. Matematické modelování neustáleného proudění. Ediční středisko ČVUT. 1992. 223 s. ISBN 80-01-00764-2.
- [6] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS – River Analysis System – Applications Guide. Version 5.0. 02/2015
- [7] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS – River Analysis System – Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. 02/2015
- [8] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS – River Analysis System – 2D Modeling User's Manual. Version 5.0. 02/2015
- [9] ČÚZK, Geoportál ČÚZK [online], © 2010 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(pi5p1yftvcxunbvgakyhzlym\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(pi5p1yftvcxunbvgakyhzlym))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)
- [10] MATTAS, Daniel. Výpočet průtoku v otevřených korytech. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, v.v.i. Praha 2014. ISBN 978-80-87402-27-6.
- [11] CHOW, Ven Te. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill. 1959. ISBN 07-010776-9.
- [12] SCHNEIDER, V.R. a G.J. ARCEMENT, Jr. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains WSP2339 [online], © [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf>
- [13] KOLÁŘ, Václav a kolektiv. Hydraulika. STNL. Praha 1983

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Fotodokumentace

Foto 1 Pohled na jez proti proudu	65
Foto 2 Pohled na pravý pilíř	65
Foto 3 Pohled na pravý pilíř	66
Foto 4 Pohled na vývar	66
Foto 5 Nátok do přivaděče.....	67
Foto 6 Pohled na levý pilíř jezu s lávkou	67
Foto 7 Nátok do přivaděče.....	67
Foto 8 Silniční most ř. km 1,419	68
Foto 9 Vrchní úsek přivaděče.....	68
Foto 10 Silniční most v obci Zlích ř. km 1,945.....	68
Foto 11 Hrázka s asfaltovou komunikací	69
Foto 12 Inundační území za tělesem hrázky	69
Foto 13 Napojení hrázky na inundační přeliv	70
Foto 14 Inundační přeliv	70
Foto 15 Pohled na inundační přeliv	70
Foto 16 Koryto řeky Úpy I.....	71
Foto 17 Koryto řeky Úpy II.....	71
Foto 18 Lávka přes řeku Úpu, ř. km 16,000.....	72
Foto 19 Vilémův most přes řeku Úpu I, ř. km 14,640.....	72
Foto 20 Vilémův most přes řeku Úpu II, ř. km 14,640	72
Foto 21 Ludrův mlýn a okolní zástavba	73
Foto 22 Cihelná zeď pod zástavbou	73
Foto 23 Přivaděč k Ludrovu mlýnu.....	74
Foto 24 Inundační území Babiččina údolí I	74
Foto 25 Inundační území Babiččina údolí II	74
Foto 26 Inundační území Babiččina údolí III.....	75
Foto 27 Ratibořický zámek.....	75
Foto 28 Komunikace vedoucí k Ratibořickému zámku	75
Foto 29 Ústí potoku Olešnice do řeky Úpy u Vilémova mostu, ř. km 14,645	76

Příloha B – Výkresy

- B.a. Situace
- B.b.a-c. Příčné profily (list 1 – list 3)
- B.c.a-c. Podélný profil (list 1 – list 3)

- Varianta I. se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. a hladinou vody v nádrži, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči

- B.A.b. Tematická mapa – hladiny – I.
- B.A.c. Tematická mapa – rychlosti proudění – I.

- Varianta I. se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. a hladinou vody v nádrži, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči

- B.B.b. Tematická mapa – hladiny – II.
- B.B.c. Tematická mapa – rychlosti proudění – II.

- Varianta III. se sklopenou klapkou a hladinou vody v nádrži při naplnění ochranného ovladatelného prostoru

- B.C.b. Tematická mapa – hladiny – III.
- B.C.c. Tematická mapa – rychlosti proudění – III.

Příloha C – Psaný podélný profil

Úrovně hladin – úsek 1 - ř. km 13.358 - ř. km 14.813	77
Úrovně hladin – úsek 2 - ř. km 14.821 - ř. km 16.300	78
Úrovně hladin – úsek 3 - přivaděč - ř. km 0.030 - ř. km 2.337	79

Příloha D – Tematické mapy z bakalářské práce Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích

Tematická mapa 1 Mapa svislicových rychlostí (program SMS) [2].....	80
Tematická mapa 2 Mapa úrovní hladiny (program SMS) [2]	81
Tematická mapa 3 Mapa svislicových rychlostí (program SMS) [2].....	82
Tematická mapa 4 Mapa úrovní hladiny (program SMS) [2]	83

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Obrys mapy ČR s umístěním vodního díla Rozkoš	5
Obrázek 2.2 Přehledná situace VD Rozkoš [2]	6
Obrázek 2.3 Pohled z hlavní hráze na elektrárnu a sádky	7
Obrázek 2.4 Průběh povodně v roce 2013 na VD Rozkoš [3]	8
Obrázek 2.5 Schéma rozdělovacího objektu [2].....	10
Obrázek 2.6 Levý jezový pilíř	11
Obrázek 2.7 Nejnovější úprava na Zlíčském jezu – obtokový kanál v levém pilíři.....	12
Obrázek 2.8 Jez ve Zlíči, ř.km 14,780 – pohled proti proudu	13
Obrázek 2.9 Zemní hrázka s asfaltovou komunikací	13
Obrázek 2.10 Přejezdný inundační přeliv.....	14
Obrázek 2.11 Vzorový příčný profil přivaděče	15
Obrázek 2.12 Úpský přivaděč v obci Zlíč	16
Obrázek 2.13 Přehledná situace modelované oblasti [2].....	17
Obrázek 4.1 Příčný profil vložený do programu HEC-RAS	25
Obrázek 4.2 Schéma elementárního objemu [7]	26
Obrázek 4.3 Modelování mostu v programu HEC-RAS [7]	28
Obrázek 4.4 Modelování jezu v programu HEC-RAS	29
Obrázek 4.5 Uzel v programu HEC-RAS - Babiččino údolí.....	30
Obrázek 5.1 2D síť v programu HEC-RAS.....	36
Obrázek 5.2 Ukázka výpočetní sítě v programu SMS [2].....	38
Obrázek 5.3 Fotografie inundačního území s určenou hodnotou Manningov... [12].....	40
Obrázek 5.4 Fotografie inundačního území Babiččina údolí [2].....	41
Obrázek 6.1 Rozdělení průtoků v závislosti na ... - Varianta I.....	45
Obrázek 6.2 Rozdělení průtoků v závislosti na ... - Varianta I.....	46
Obrázek 6.3 Rozdělení průtoků v závislosti na ... – přivaděč – Varianta I.	47
Obrázek 6.4 Rozdělení průtoků v závislosti na ... - Varianta II.	48
Obrázek 6.5 Rozdělení průtoků v závislosti na ... - Varianta II.	49
Obrázek 6.6 Rozdělení průtoků v závislosti na ... – přivaděč – Varianta II.....	50
Obrázek 6.7 Součinitel přepadu pro Jamborův práh [13].....	51
Obrázek 6.8 Rozdělení průtoků v závislosti na ... - Varianta III.	52

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Tabulka N-letých průtoků v profilu jezu ve Zlíči.....	10
Tabulka 2.2 Rozdělení průtoků podle návrhu	14
Tabulka 2.3 Rozdělení průtoků v korytě řeky Úpy	14
Tabulka 5.1 Hodnoty Manningova součinitele drsnosti.....	40
Tabulka 7.1 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu - Varianta I.	54
Tabulka 7.2 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu - Varianta II.....	55
Tabulka 7.3 Porovnání rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu - Varianta III.	55

13 SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Definice	Jednotka
A_k	plocha strany elementu	$[m^2]$
c_f	konstanta dnového tečného napětí	$[-]$
C	Chezyho rychlostní součinitel	$[m^{1/2}.s]$
C	součinitel přepadu	$[m^{1/2}.s]$
C_d	součinitel přepadu	$[-]$
D	bezrozměrná empirická konstanta	$[-]$
f	Coriolisův parametr	$[-]$
g	gravitační zrychlení	$[m.s^{-2}]$
h	hloubka proudění	$[m]$
H	výška hladiny měřená od základny	$[m]$
k	jednotkový vektor ve svislém směru	$[m]$
l_k	délka strany k elementu	$[m]$
L	délka přelivné hrany	$[m]$
M_c	jednotkový tok hybnosti mezi inundací a korytem	$[kg.s^{-1}]$
M_f	jednotkový tok hybnosti mezi inundací a korytem	$[kg.s^{-1}]$
n	Manningův součinitel drsnosti	$[m^{1/6}]$
p	tlak	$[Pa]$
P	plocha elementu	$[m^2]$
q	měrný průtok	$[m^2.s^{-1}]$
q_l	jednotkový boční (laterální) průtok	$[m^2.s^{-1}]$
q_c	jednotkový průtok mezi korytem a inundací	$[m^2.s^{-1}]$
q_f	jednotkový průtok mezi korytem a inundací	$[m^2.s^{-1}]$
Q	evaporace, infiltrace, průtok	$[m^3.s^{-1}]$
Q_l	boční (laterální) přítok	$[m^3.s^{-1}]$
Q_l	průměrný boční (laterální) přítok	$[m^3.s^{-1}]$
R	hydraulický poloměr	$[m]$
S	sklon čáry energie	$[-]$

S_f	sklon čáry energie	[-]
S_k	objem elementu	[m ³]
t	čas	[s]
u, v	bodové rychlosti proudění ve směru os x a y	[m.s ⁻¹]
u^*	třecí rychlost u dna	[m.s ⁻¹]
U, V	průměrné svislicové rychlosti proudění ve směru os x a y	[m.s ⁻¹]
V	rychlostní vektor	[m.s ⁻¹]
$ V $	velikost rychlostního vektoru	[-]
V_k	objem elementu	[m ³]
ν_t	průměrná turbulentní kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ω	úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
x, y, z	prostorové souřadnice	[m]
α	Coriolisovo číslo	[-]
β	Boussinesqovo číslo	[-]
ρ	hustota kapaliny	[kg.m ⁻³]
μ_p	součinitel přepadu	[-]
∂	symbol parciální derivace	
∇	diferenciální operátor	
Ω	objemový prvek	
φ	zeměpisná délka	

Příloha A – FOTODOKUMENTACE

ČÁST A

Rozdělovací objekt v Ratibořicích se skládá z jezu ve Zlíči, nátoku do přivaděče, Úpského přivaděče, zemní hrázky v nadjezí a inundačního přelivu. Následující fotodokumentace slouží k zpřesnění popisu modelované oblasti.

1) JEZ VE ZLÍČI



Foto 1 Pohled na jez proti proudu



Foto 2 Pohled na pravý pilíř



Foto 3 Pohled na pravý pilíř



Foto 4 Pohled na vývar

2) NÁTOK DO PŘIVADĚČE



Foto 5 Nátok do přivaděče



Foto 6 Pohled na levý pilíř jezu s lávkou



Foto 7 Nátok do přivaděče

3) ÚPSKÝ PŘIVADĚČ



Foto 8 Silniční most ř. km 1,419



Foto 9 Vrchní úsek přivaděče



Foto 10 Silniční most v obci Zlích ř. km 1,945

4) ZEMNÍ HRÁZKA V NADJEZÍ



Foto 11 Hrázka s asfaltovou komunikací



Foto 12 Inundační území za tělesem hrázky

5) INUNDAČNÍ PŘELIV



Foto 13 Napojení hrázky na inundační přeliv



Foto 14 Inundační přeliv



Foto 15 Pohled na inundační přeliv

ČÁST B

V části B fotodokumentace je zdokumentováno koryto řeky Úpy. Pro výpočet byly uvažovány dvě hodnoty Manningova součinitele drsnosti, jedna hodnota pro dno koryta, druhá hodnota pro svahy břehů.

1) KORYTO ŘEKY ÚPY



Foto 16 Koryto řeky Úpy I



Foto 17 Koryto řeky Úpy II

2) OBJEKTY NA ŘECE ÚPĚ



Foto 18 Lávka přes řeku Úpu, ř. km 16,000



Foto 19 Vilémův most přes řeku Úpu I, ř. km 14,640

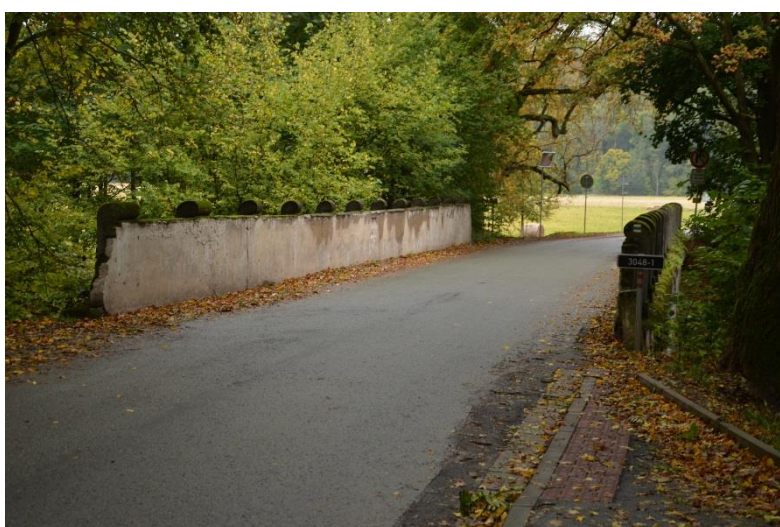


Foto 20 Vilémův most přes řeku Úpu II, ř. km 14,640

ČÁST C

Další důležitou součástí je modelování inundačního území v místě Babiččina údolí. Následující fotografie zobrazují povrch inundačního území a jeho zástavbu.

1) ZÁSTAVBA



Foto 21 Ludrův mlýn a okolní zástavba



Foto 22 Cihelná zeď pod zástavbou



Foto 23 Přivaděč k Ludrovu mlýnu

2) POVRCH INUNDAČNÍHO ÚDOLÍ



Foto 24 Inundační území Babiččina údolí I



Foto 25 Inundační území Babiččina údolí II



Foto 26 Inundační území Babiččina údolí III

3) DŮLEŽITÉ OBJEKTY V MODELOVANÉ OBLASTI



Foto 27 Ratibořický zámek



Foto 28 Komunikace vedoucí k Ratibořickému zámku



Foto 29 Ústí potoku Olešnice do řeky Úpy u Vilémova mostu, ř. km 14,645

Příloha C – Psaný podélný profil

- průtok pro všechny varianty – $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ř. km	VARIANTA I.	VARIANTA II.	VARIANTA III.
13.358	279.37	279.37	279.64
13.416	279.40	279.41	279.69
13.483	279.43	279.44	279.72
13.539	279.51	279.52	279.83
13.623	279.61	279.61	279.91
13.673	279.69	279.70	280.00
13.756	279.82	279.83	280.12
13.886	280.00	280.01	280.31
14.018	280.28	280.28	280.64
14.094	280.52	280.53	280.97
14.151	280.61	280.61	281.05
14.244	280.72	280.73	281.20
14.325	280.98	280.99	281.58
14.437	281.17	281.18	281.81
14.520	281.46	281.48	282.26
14.591	281.63	281.64	282.49
14.635	281.74	281.75	282.64
14.641	281.74	281.75	282.64
14.700	281.82	281.83	282.85
14.732	281.83	281.84	282.81
14.768	281.81	281.83	282.70
14.778	281.82	281.83	282.65
14.780	284.72	284.73	282.62
14.784	284.72	284.73	282.62
14.793	284.72	284.73	282.62
14.795	284.72	284.73	282.62
14.800	284.72	284.73	282.62
14.808	284.72	284.73	282.62
14.813	284.72	284.73	282.62

Úrovně hladin – úsek I - ř. km 13.358 - ř. km 14.813

ř. km	VARIANTA I.	VARIANTA II.	VARIANTA III.
14.821	284.72	284.73	282.64
14.826	284.71	284.72	282.61
14.836	284.72	284.73	282.58
14.846	274.73	284.74	282.65
14.864	284.73	284.74	282.49
14.908	284.75	284.76	283.02
14.948	284.79	284.80	283.54
14.990	284.80	284.81	283.60
15.031	284.81	284.82	283.73
15.087	284.80	284.81	283.86
15.139	284.83	284.84	283.99
15.207	284.99	285.00	284.42
15.251	285.06	285.07	284.59
15.339	285.10	285.10	284.67
15.358	285.10	285.10	284.66
15.381	285.11	285.11	284.68
15.418	285.12	285.13	284.73
15.477	285.14	285.14	284.78
15.524	285.15	285.14	284.78
15.604	285.16	285.16	284.90
15.661	285.16	285.16	284.94
15.706	285.21	285.21	285.01
15.753	285.16	285.17	284.99
15.816	285.22	285.23	285.08
15.865	285.32	285.32	285.22
15.894	285.32	285.33	285.23
15.923	285.35	285.35	285.26
15.958	285.37	285.37	285.28
15.980	285.35	285.36	285.27
16.014	285.56	285.56	285.52
16.051	285.55	285.55	285.51
16.102	285.56	285.56	285.51
16.145	285.67	285.67	285.66
16.200	285.69	285.69	285.66
16.300	286.54	286.54	286.53

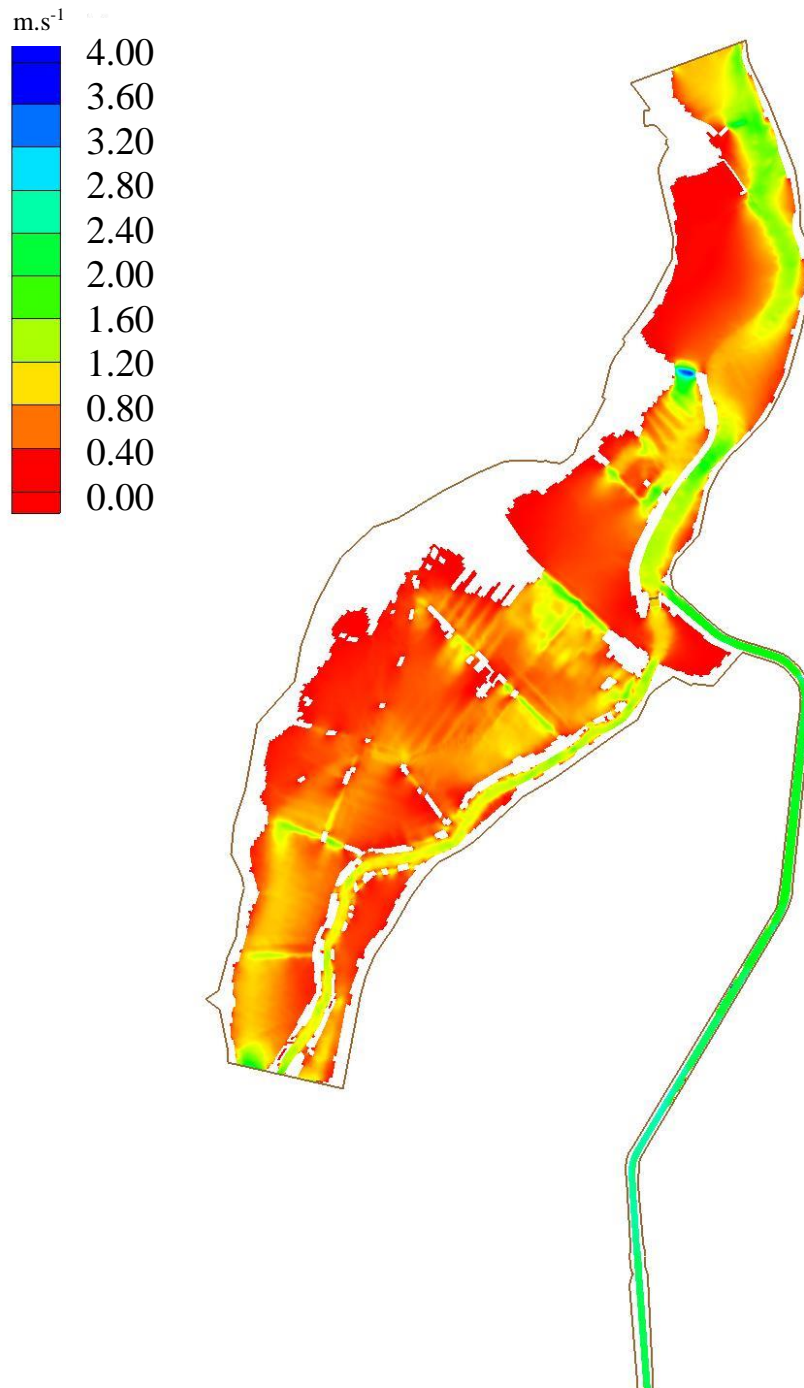
Úrovně hladin – úsek 2 - ř. km 14.821 - ř. km 16.300

ř. km	VARIANTA I.	VARIANTA II.	VARIANTA III.
0.030	282.05	282.60	282.60
0.230	282.27	282.77	282.60
0.430	282.50	282.93	282.60
0.630	282.73	283.10	282.61
0.830	282.95	283.27	282.61
1.030	283.18	283.44	282.61
1.230	283.41	283.61	282.61
1.430	283.63	283.78	282.61
1.630	283.85	283.94	282.61
1.830	284.07	284.10	282.61
1.928	284.20	284.20	282.61
1.942	284.10	284.10	282.61
1.948	284.23	284.27	282.61
1.953	284.36	284.40	282.61
2.030	284.43	284.46	282.61
2.230	284.63	284.65	282.61
2.318	284.71	284.72	282.61
2.327	284.72	284.73	282.62
2.329	284.75	284.76	282.62
2.337	284.72	284.73	282.62

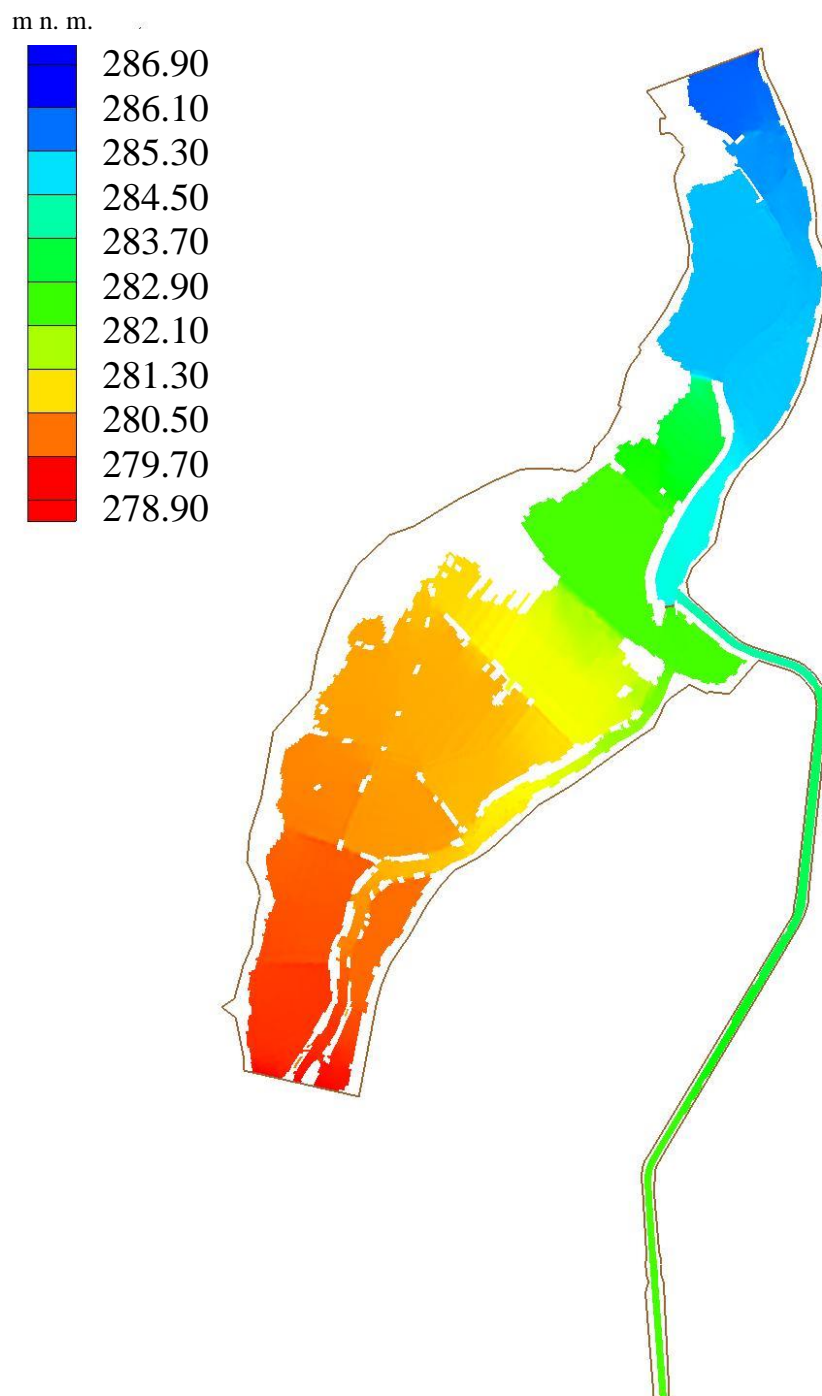
Úrovně hladin – úsek 3 - přivaděč - ř. km 0.030 - ř. km 2.337

Příloha D – Tematické mapy z bakalářské práce

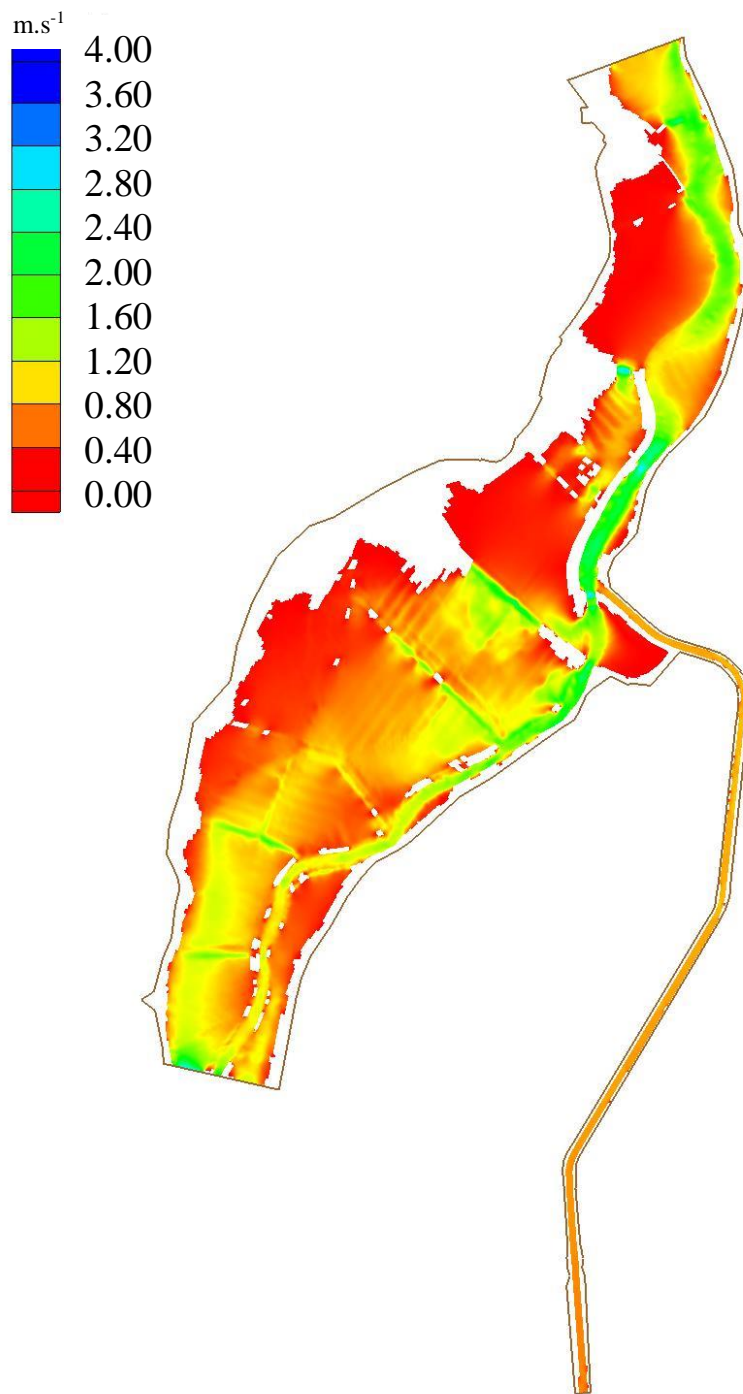
Hydraulická studie rozdělovacího objektu na řece Úpě v Ratibořicích



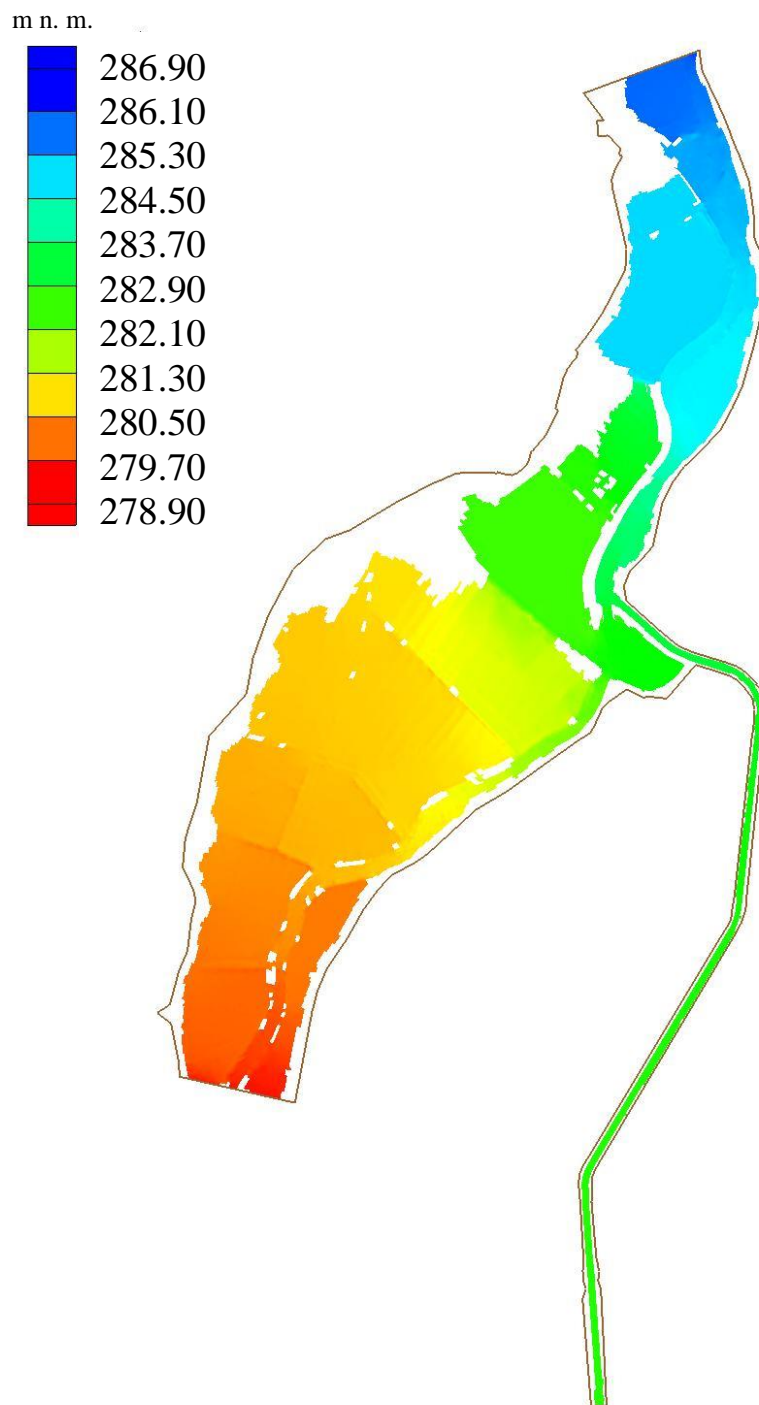
Tematická mapa 1 Mapa svislicových rychlostí pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči (program SMS) [2]



Tematická mapa 2 Mapa úrovní hladiny pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči (program SMS) [2]



*Tematická mapa 3 Mapa svislicových rychlostí pro variantu se sklopenou klapkou (program SMS)
[2]*



Tematická mapa 4 Mapa úrovní hladiny pro variantu se sklopenou klapkou (program SMS) [2]