



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

Bakalářská práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

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

Vilém Ernest

Praha 2016

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 bakalářské práce doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc., za odborné rady a vřelý přístup. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Kladivovi z Povodí Labe, s. p. za poskytnutí potřebné dokumentace potřebné pro řešení bakalářské práce. Nakonec bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá hydraulickou studií rozdělovacího objektu vodního díla Rozkoš na řece Úpě. Studie je založena na dvourozměrném matematickém modelování proudění vody rozdělovacím objektem. Důraz je kladen na ověření plnění funkce rozdělovacího objektu při převádění části návrhového povodňového průtoku do vodní nádrže Rozkoš.

Annotation

This thesis deals with hydraulic study of water divider on the river Úpa in Ratibořice which is part of hydraulic structure Rozkoš by using two-dimensional mathematical modelling of water flow. An emphasis is placed on verification of the water divider function during conversion of partial proposal flood flow rate to water reservoir Rozkoš.

Klíčová slova

Hydraulika otevřených koryt, dvourozměrné matematické modelování proudění vody, FESWMS, Flo2DH, rozdělovací objekt

Keywords

Open-channel hydraulics, two-dimensional mathematical modelling of water flow, FESWMS, Flo2DH, water divider

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	POPIS ŘEŠENÉHO ÚZEMÍ	4
2.1	Vodní dílo Rozkoš	4
2.1.1	Základní údaje VD Rozkoš	4
2.1.2	Výstavba VD Rozkoš	5
2.1.3	Ochranná funkce vodní nádrže Rozkoš	5
2.1.4	Popis rozdělovacího objektu ve Zlíči	5
2.1.5	Úpský přivaděč	9
2.2	Řešená oblast	10
3	TEORIE MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ V HYDRAULICE	13
3.1	Přístupy k modelování proudění s volnou hladinou	13
3.1.1	Jednorozměrné proudění.....	13
3.1.2	Dvourozměrné proudění	14
3.1.3	Trojrozměrné proudění	16
4	VÝPOČETNÍ PROGRAM SMS	17
4.1	SMS	17
4.2	FESWMS Flo2DH.....	17
4.2.1	Metoda vážených reziduí.....	17
4.2.2	Hydrodynamické výpočty.....	19
5	VYTVOŘENÍ MODELU	25
5.1	Geodetické podklady	25
5.2	Sestavení výpočetní sítě.....	25
5.2.1	Parametry výpočetní sítě	25
5.2.2	Určení odporu povrchu.....	27
5.3	Počáteční a okrajové podmínky	29

5.4	Verifikace a kalibrace modelu	30
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	32
7	ZÁVĚR.....	36
8	LITERATURA.....	37
9	SEZNAM PŘÍLOH	39
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	40
11	SEZNAM TABULEK	41
12	SEZNAM SYMBOLŮ	42
	Příloha A – Tematické mapy	45
	Příloha B – Fotodokumentace	53

1 ÚVOD

Výstavba vodního díla Rozkoš probíhala v 60. a 70. letech 20. století – tedy v době, kdy nebyly k dispozici žádné výpočetní programy, které by mohly být použity při navrhování stavby. V roce 2007 prošlo vodní dílo rekonstrukcí, při níž byly potřebné výpočty pro přestavbu rozdělovacího objektu řešeny pomocí jednorozměrného matematického modelování ustáleného nerovnoměrného proudění ve výpočetních programech Hydrocheck 1 a Hydrocheck 2.

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením funkce rozdělovacího objektu při převádění části návrhového povodňového průtoku do vodní nádrže Rozkoš použitím dvourozměrného matematického modelu ustáleného nerovnoměrného proudění v softwaru SMS s matematickým modulem FESWMS a výpočetním programem Flo2DH.

Rozdělovací objekt je tvořen jezem ve Zlíči, nátokem do přivaděče a přilehlými hrázkami. Podstatnou úlohu plní pravostranný inundační přeliv, který převádí část povodňového průtoku do pravostranné inundace a vymezuje množství vody, které zůstává v korytě řeky Úpy a směřuje k jezu ve Zlíči. Právě míra rozdělení návrhového povodňového průtoku mezi pravostrannou inundaci, jez ve Zlíči a přivaděč jsou primárními otázkami této práce.

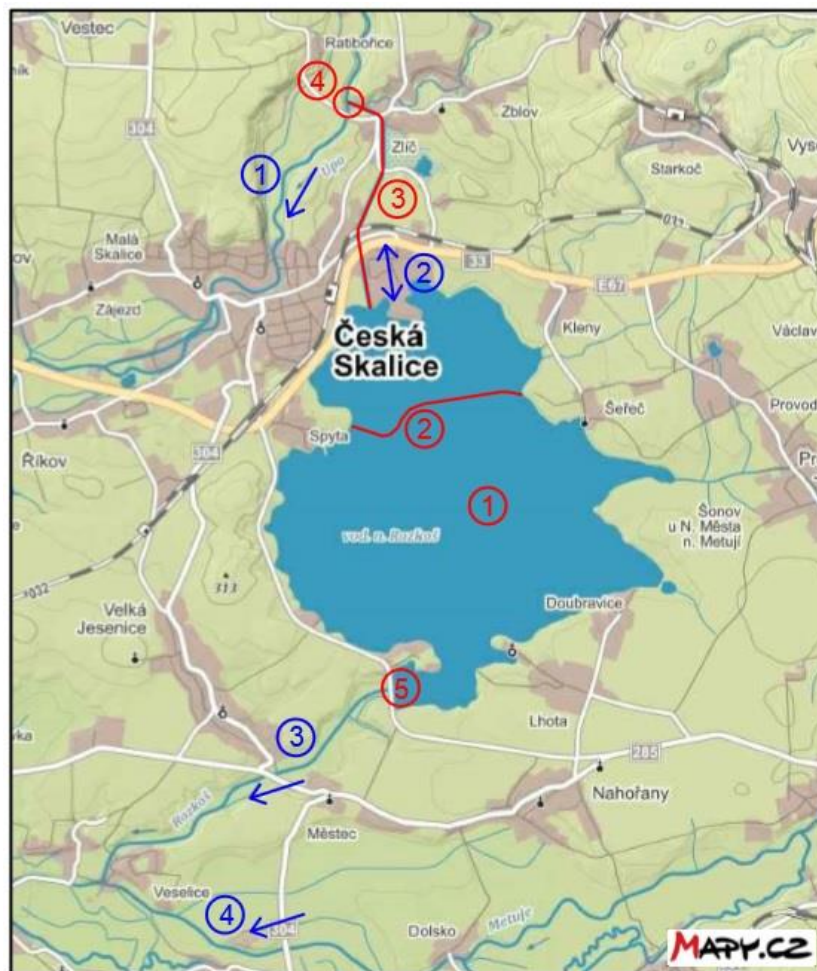
2 POPIS ŘEŠENÉHO ÚZEMÍ

2.1 Vodní dílo Rozkoš

2.1.1 Základní údaje VD Rozkoš

Vodní dílo Rozkoš se nachází ve východních Čechách v okrese Náchod. Skládá se z vodní nádrže Rozkoš rozdělené Rovenskou hrází na jižní a severní část, vodní elektrárny pod hlavní hrází, Úpského přivaděče a klapkového jezu na Úpě. Úpský přivaděč propojuje vodní nádrž Rozkoš s řekou Úpou.

Voda z vodní nádrže Rozkoš odtéká Rozkošským potokem, který se vlévá do řeky Metuje. Ta následně ústí do řeky Labe.



- | | |
|----------------------|-------------------|
| 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 2.1 Přehledná situace vodního díla Rozkoš [4]

2.1.2 Výstavba VD Rozkoš

Prvotní plány na výstavbu VD Rozkoš vznikly již ve 20. letech 20. století. Samotná výstavba byla zahájena až v roce 1951, o rok později však byla zastavena. Znovu se na stavbě začalo pracovat až v roce 1964. Provoz vodního díla byl zahájen o osm let později – v roce 1972. [1]

2.1.3 Ochranná funkce vodní nádrže Rozkoš

Při povodňové situaci na řece Úpě je přivaděčem odváděna část povodňového průtoku do vodní nádrže Rozkoš. Toto opatření částečně chrání město Česká Skalice a další obce ležící na řece Úpě až po město Jaroměř.

Neškodný průtok na jezu ve Zlíči má hodnotu $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jakmile je tento limit překročen, manipulací s klapkovým jezem ve Zlíči se převede další část průtoku přivaděčem do vodní nádrže Rozkoš. Přivaděč je navržen na hodnotu průtoku $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. [2]

Při naplnění retenčního prostoru nádrže (ochranného ovladatelného prostoru) je převod vody z Úpy přivaděčem zastaven a veškerý povodňový průtok zůstává v korytě a v inundačním území řeky Úpy. [2]

Když se povodňový průtok vrátí pod hodnotu $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, je retenční prostor nádrže prázdněn zpětným převodem vody do řeky Úpy. Průtok v řece Úpě pod jezem ve Zlíči se udržuje na konstantní hladině $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (průtok v řece je doplňován průtokem z přivaděče tak, aby dosáhl této hodnoty). Přivaděč lze vzhledem k malému podélnému sklonu v celé jeho délce využívat pro obousměrné převádění průtoků. [2]

2.1.4 Popis rozdělovacího objektu ve Zlíči

Rozdělovací objekt se nachází na území národní přírodní památky Babiččino údolí a je tvořen jezem, nátokem do přivaděče a přílehlými hrázkami v nadjezí včetně pravobřežního inundačního přelivu.

Jez ve Zlíči se nachází na řece Úpě ř. km 14,780 asi 160 m proti proudu od Vilémova mostu. Jedno pole jezu je dlouhé 20 m a je hrazené ocelovou dutou klapkou výšky 3,15 m. V pravém pilíři je zabudován zdvihací mechanismus klapky. Pohon klapky cévovou tyčí lze ovládat z místa, dálkově z kanceláře jezného nebo automaticky dle stavu hladiny nad jezem a pod jezem. V případě výpadku elektrické energie je možno manipulovat klapkou manuálně klikou. Betonový práh jezu je na kótě 279,80 m n. m., kóta maximálně vztyčené klapky je

282,95 m n. m. Přes takto vztyčenou klapku lze připustit maximální přepad vodního paprsku 1,47 m. V případě dalšího vzestupu hladiny již dochází k manipulaci s klapkou. [2]

Automatické ovládání jezu lze nastavit ve dvou režimech:

- 1) konstantní průtok v Úpě pod jezem směrem na Českou Skalici – tzv. regulace na průtok – sonda u limnigrafu Vilémova mostu, která se nachází asi 190 m pod jezem, je vybavena přenosem údajů do řídicího systému jezu a následnou manipulací klapky je zajištěn konstantní průtok [2]
- 2) udržování konstantní hladiny na jezu [2]

V levém jezovém pilíři je obtok pro převádění nutného minimálního průtoku při zahrazeném jezu, rybí přechod a na kótě 279,35 m n. m. vtok do limnigrafu. Rybí přechod je vyřazen z činnosti při sklopení klapky a za povodní, kdy je hladina nad jezem vyšší než 281,65 m n. m. [2]

Pod hradicí klapkou je vývar upravený podle hydrotechnického výzkumu VÚV TGM, v. v. i. Dno vývaru má kótu 277,15 m n. m. Délka vývařiště ve dně je 11,25 m. Vývar je ukončen prahem ve sklonu 1:3 o kótě 278,75 m n. m. Na práh navazuje zához z těžkého kamene. Zához má délku 8 m a tloušťku 1,2 m a je ukončen ve sklonu 1:1. [2]

Maximální ovladatelný průtok jezem je $190,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Kóta koruny horní části jezových pilířů je 284,30 m n. m. dolní části 281,60 m n. m. Kóta navýšené zídky na horní části pilířů je po rekonstrukci 284,85 m n. m. [2]



Obrázek 2.2 Jez ve Zlíči (pohled proti proudu)

V roce 2007 byla provedena rekonstrukce vodního díla Rozkoš včetně rozdělovacího objektu na základě výpočtů z programů Hydrocheck 1 a Hydrocheck 2. Tyto programy jsou založeny na jednorozměrném matematickém modelování ustáleného nerovnoměrného proudění vody. Bylo zjištěno, že tehdejší podoba rozdělovacího objektu nevyhovovala požadavkům rozdělení návrhového průtoku, takže bylo nutné navýšit tělesa hrázek a pilířů jezu. Horní části pilířů jezu byly proto navýšeny betonovou zídskou z kóty 284,30 m n. m. na současnou hodnotu 284,85 m n. m. [3]

Potřebné vzdutí pro rozdělení průtoku v rozdělovacím objektu je zajištěno navýšením pravého břehu v úseku v nadjezí zemní hrázkou, po jejíž koruně vede asfaltová cyklostezka šířky 2,5 m. Hrázka, dlouhá 560 m, vychází z pravobřežního pilíře jezu a je zakončena v nezpevněné příjezdové cestě k areálu zámku v Ratibořicích. Koruna hráze je 3,0 m široká se sklonem svahů 1:2. Svahy hrázky jsou zatravněny. [3]



Obrázek 2.3 Zemní hrázka s asfaltovou cyklostezkou

Při rekonstrukci v roce 2007 byl nově vybudován přejezdový inundační přeliv na příjezdové cestě k areálu zámku v Ratibořicích. Příjezdová cesta je navýšena nad okolním terénem Babiččina údolí. Štěrková cesta je v místě inundačního přelivu zavázána betonovými prahy 1,2 m pod kótu terénu. Přeliv je 50 m dlouhý a 3,6 m široký. Vybudováním inundačního přelivu má být podle návrhu zajištěno rozdělení návrhového průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mezi koryto řeky Úpy ($230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a pravostrannou inundaci ($26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). [3]



Obrázek 2.4 Pravobřežní inundační přeliv

2.1.5 Úpský přivaděč

Voda do nádrže Rozkoš je přiváděna z Úpy přivaděčem dlouhým 2337 m, který se napojuje na řeku Úpu těsně nad jezem ve Zlíči. Průtok vody přivaděčem se reguluje nastavením klapky jezu ve Zlíči. Dno přivaděče má stálý podélný sklon 0,075 %. Vzhledem k malému sklonu je přivaděč využíván pro obousměrné proudění vody. Přivaděč lze tedy kromě odvádění části průtoku z řeky Úpy používat například pro prázdňení ochranného prostoru nádrže. [2]

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 lávky pro pěší. Trasu přivaděče dále protíná plynovod a potok Olešnice, který je převáděn shybkou pod přivaděčem. Přivaděč má příčný profil ve tvaru složeného lichoběžníku. Dno 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 podsypu. Pod patkami svahů je v hloubce 90 cm pode dnem oboustranně vedená drenáž z betonových trub \varnothing 20 cm. 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 tedy 5,0 m a šířka 21,31 m. Přivaděč je volně vyústěn do severní části vodní nádrže Rozkoš a ukončen betonovým prahem na kótě 277,00 m n. m. a kamenným záhozem. [2]

Maximální kapacitní průtok přivaděče byl navýšen na současnou hodnotu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při rekonstrukci v roce 2007. Předtím byla hodnota kapacitního průtoku pouze $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Během výpočtů použitých při rekonstrukci byl uznán horní úsek přivaděče od jezu ve Zlíči po profil asi 60 m pod zlíčským mostem jako nekapacitní. Zeď na hrázce levého břehu pod zlíčským mostem byla v délce 61 m navýšena betonovou nadezdívkou o přibližné výšce 0,4 m tak, aby při průchodu kapacitního průtoku nedošlo k jejímu přelití. Stejně byla navýšena i betonová zídka na pravém břehu v délce 57 m. Úsek na levém břehu mezi zlíčským mostem a jezem je tvořen zemní hrázkou, po které vede přístupová asfaltová cesta k jezu. Hrázka byla při rekonstrukci navýšena v délce 301 m betonovou zídkou o výšce 0,9 m se závazáním 1,8 m pod terén. Šířka této zídky je 0,25 m. Pravostranná zemní hrázka byla navýšena zemním materiálem v délce 302 m. Koruna pravostranné hrázky má šířku 3,0 m a sklony svahů 1:2. Tyto úpravy vedly ke zvětšení kapacitního průtoku přivaděče o $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na současnou hodnotu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. [3]



Obrázek 2.5 Úpský přivaděč v obci Zlíč

2.2 Řešená oblast

Předmětem této bakalářské práce je úsek koryta a oblast inundace řeky Úpy v národní přírodní památce Babiččino údolí a v okolí jezů ve Zlíči, ř. km 14,780. Řešený úsek začíná v příčném profilu, ř. km 15,323, 543 m proti proudu od jezů, kde se v pravostranné inundaci nachází uměle vybudovaný inundační přeliv. V úseku mezi jezem a profilem s inundačním přelivem je vybudována pravobřežní zemní hrázka, která soustřeďuje průtok do koryta řeky. To je v tomto úseku navrženo na návrhový průtok $Q = 230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s tím, že při větším průtoku je veškeré další průtočné množství převáděno inundačním přelivem do rozlehlého území pravostranné inundace. Správné fungování při rozdělování průtoku mezi jez a přivaděč je podle návrhu zajištěno maximálním ovladatelným průtokem $Q = 230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Základní otázkou při řešení této bakalářské práce je rozdělení průtoku v profilu řeky Úpy v ř. km 15,323 mezi inundační přeliv a koryto řeky a dále potom rozdělení průtoku v korytě řeky Úpy v rozdělovacím objektu jezů ve Zlíči mezi přivaděč a koryto řeky Úpy při povodňovém průtoku $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



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

Obrázek 2.6 Přehledná situace řešené oblasti [4]

Při modelování je zapotřebí zvětšit řešenou část toku řeky o nátokovou a výtokovou oblast. V těchto místech dojde ke správnému rozložení rychlostí a směrů proudění.

Modelovaná oblast je vymezena příčnými profily řeky Úpy. Horní profil v ř. km 16,130 se nachází v místě asi 150 metrů nad lokální zástavbou tvořenou Ludrovým mlýnem, mandlem a dalšími třemi budovami. Dolní profil v ř. km 13,313 se nachází v zúžení Babiččina údolí v místě asi 220 metrů nad jezem u České Skalice.



- | | |
|-------------------------------------|------------------|
| ① Horní profil modelované oblasti | ① Úpa I |
| ② Lokální zástavba, Luderův 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 2.7 Přehledná situace modelované oblasti [4]

3 TEORIE MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ V HYDRAULICE

3.1 Přístupy k modelování proudění s volnou hladinou

Pohyb tekutin v přírodě je obecně neustálený a trojrozměrný. Při modelování hydraulických jevů se používá matematická a také experimentální forma. Ta je však časově náročná a pojí se s vysokými finančními náklady, a tak je stále více využívána matematická forma. Nárůst objemu matematického modelování je také úzce spojen s rozvojem výpočetní techniky. [5]

Matematické modelování dvourozměrného proudění vody, které bylo použito při vypracování této bakalářské práce, je jedním z přístupů k modelování proudění s volnou hladinou. Mezi další používané přístupy patří modelování jednorozměrného a trojrozměrného proudění. Jednotlivé přístupy se liší prostorovým pojetím proudění, s nímž jsou spojené další předpoklady, např. zanedbávání rychlostních složek v určitém směru.

3.1.1 Jednorozměrné proudění

Jednorozměrné proudění je definováno tak, že pouze jediná složka rychlosti je nenulová. Další dvě složky (vertikální a jedna horizontální) jsou nulové. Řešená oblast (koryto vodního toku a inundační území) je charakterizována příčnými profily a odpory jednotlivých povrchů. Rychlostní pole v příčném profilu je rovnoměrné, mluvíme o průřezové rychlosti. Dalším předpokladem pro sestavení rovnic jednorozměrného proudění je vodorovná hladina v příčném profilu. Vliv turbulence je vyjádřen Chézyho nebo Manningovou rovnicí. Předpokládá se, že lze užít analogického přístupu pro vyjádření odporu členu. Vliv turbulence tedy není řešen zvlášť. Jeho vliv se zahrnuje do Manningova součinitele drsnosti. Hodnota měrné hmotnosti ρ je při řešení konstantní, předpokládá se nestlačitelnost vody. [7]

V modelování jednorozměrného proudění vody se při řešení používá Bernoulliho rovnice a rovnice spjitosti a řeší se metodou po úsecích. Úsek je tvořen prostorem mezi dvěma sousedními příčnými profily. [7]

Nevýhodou modelování jednorozměrného proudění vody je předpoklad konstantní úrovně hladiny v příčných profilech. Koryto je charakterizováno pouze příčnými profily – průběh hladiny mezi nimi není zcela přesný. Naopak výhodou je poměrně snadné sestavení modelu a hlavně finanční náklady, které jsou v porovnání s dalšími metodami nízké. [7]

3.1.2 Dvourozměrné proudění

Při modelování dvourozměrného proudění vody se zanedbává svislá složka rychlosti. Jedním z předpokladů při jejím zanedbání je použití v mělkých vodách, kde nedochází k velkým recirkulacím vody ve svislém směru. Vodní tok je popsán dvěma směry v horizontální rovině. Hladina není vodorovná v žádném příčném profilu a vliv turbulence je řešen zvlášť. Na rozdíl od jednorozměrného proudění, kde je model tvořen sadou příčných profilů, je oblast řešení při dvourozměrném proudění charakterizována sítí bodů se souřadnicemi $[x,y,z]$. [7]

Modelování dvojrozměrného proudění vody využívá při řešení pohybové rovnice a rovnici spjitosti. Jsou známy tři přístupy numerického řešení.

3.1.2.1 Numerické metody

Model je účelově zjednodušené zobrazení reálného světa. Při popisu náhradní oblasti jsou využívány numerické metody, mezi které patří: metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů a metoda konečných prvků. Každá z uvedených metod rozdělí náhradní oblast na elementy. Sousední elementy mají společné body – uzly. Každá numerická metoda používá různé postupy při rozdělování oblasti na elementy. Každý element je poté řešen řídicími rovnicemi využitím počátečních podmínek. [5]

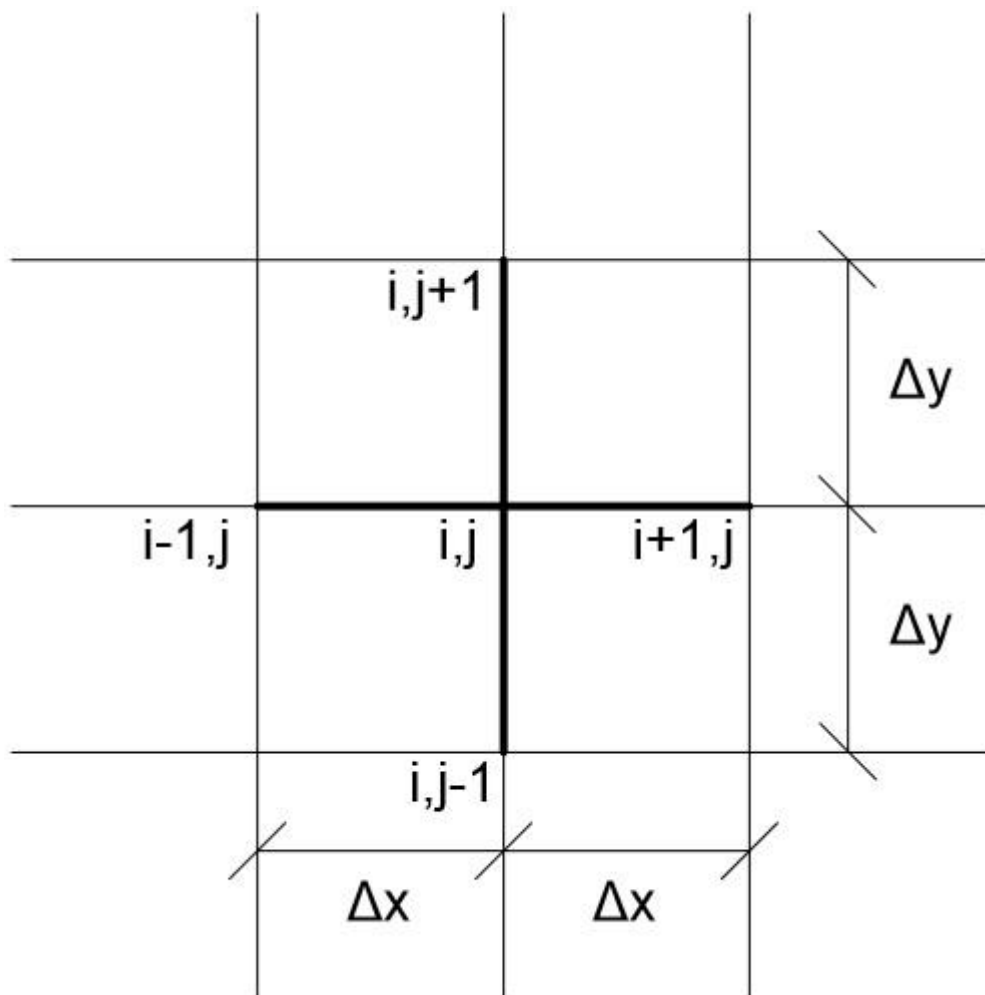
Jednotlivé úlohy hydrodynamiky jsou popisovány soustavou řídicích rovnic (parciální diferenciální rovnice) a okrajovými a počátečními podmínkami. Postupy numerických metod převedou aproximací parciální diferenciální rovnice na řadu algebraických, obvykle lineárních rovnic. Jejich řešením se získají hodnoty hledaných veličin v bodech náhradní oblasti. [5]

Metoda konečných diferencí je pravděpodobně nejstarší numerickou metodou. Náhradní oblast je rozdělena do ortogonální výpočetní sítě se stejným krokem Δx a Δy . Rozdělení do ortogonální sítě nepřesně zobrazuje povrch oblasti. V modelu tak nejsou zobrazeny hrany terénu a je obtížné do modelu přenést překážky a objekty na toku. [5] [7]

Metoda konečných diferencí nahradí operátory parciálních derivací diferenčními operátory. Pro lepší orientaci je uveden následující příklad:

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} \approx \frac{H_{i+1,j} - H_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} \approx \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (3.2)$$



Obrázek 3.1 Ortogonální síť metody konečných diferencí [5]

Princip metody konečných objemů je založen na vytvoření modelu složeného z čtyřúhelníkových elementů, které mění svůj tvar a vnitřní úhly. [7]

Metoda konečných prvků spočívá rozdělení náhradní oblasti na konečný počet podoblastí, elementů. U dvourozměrných úloh mohou mít dva elementy buď jeden společný bod, hranu anebo nemají žádný společný bod. Přibližné řešení se hledá pomocí třídy funkcí,

kteře jsou po prvcích děleny polynomy určitého typu a stupně. Pro variační formulaci rovnice s parciálními derivacemi je možné použít Galerkinovu metodu. Rovnice je přenásobena hladkou funkcí $u(x,y)$, která splňuje okrajovou podmínku $u = 0$ na propustné části hranice a integruje se přes celou oblast řešení. Využitím okrajových podmínek dojde k vytvoření lokálních matic jednotlivých prvků. Z těch je poté sestavena výsledná matice soustavy. Řešením soustavy rovnic se získají hodnoty neznámých parametrů v uzlech náhradní oblasti. Rozdělení oblasti na prvky nevyžaduje dodržování určité struktury. Síť je tedy možné přizpůsobit tvaru oblasti řešení a očekávanému průběhu neznámé funkce. [6]

Síť metody konečných prvků je tvořena trojúhelníkovými a čtyřúhelníkovými elementy, což umožňuje přesnější vyjádření povrchu než u metody konečných diferencí. Principem metody konečných prvků je rozdělení spojitého kontinua do určitého počtu prvků. Požadované parametry (hloubka vody a vektory rychlostí) jsou poté získávány pro jednotlivé výpočetní body.

3.1.3 Trojrozměrné proudění

Modelování trojrozměrného proudění umožňuje řešit prostorový průběh proudění. Řeší se všechny složky rychlostí – podélné, příčné i svislé. Vzhledem k vysokým nárokům na výpočetní techniku je jeho použití reálné pouze pro řešení detailního proudění objekty. [7]

4 VÝPOČETNÍ PROGRAM SMS

4.1 SMS

SMS (Surface-water Modelling System) je program pro vytváření výpočetních sítí a jeho součástí jsou různé matematické modely. Matematické modely se používají při řešení proudění vody s volnou hladinou a při řešení pohybu splavenin a vlastností vody. Tyto modely jsou založeny na jednorozměrném a dvourozměrném proudění a jsou řešeny metodou konečných prvků nebo konečných diferencí.

4.2 FESWMS Flo2DH

FESWMS je jedním z matematických modelů programu SMS. Autorem modelu je David C. Froehlich a jeho vlastníkem Federal Highway Administration (Správa státních dálnic, USA). Model je určen pro výpočet dvourozměrného proudění vody s volnou hladinou a je založen na metodě konečných prvků. FESWMS tvoří počáteční písmena celého názvu – Finite Element Surface-Water Modeling System. Název lze do češtiny přeložit jako *Model pro výpočet proudění s volnou hladinou založený na metodě konečných prvků*.

Základem modelu je výpočetní program Flo2DH (The Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model) určený pro simulaci pohybu vody a splavenin v řekách, ústích řek a pobřežních vodách. Program řeší dvourozměrné ustálené a neustálené proudění vody a pohyb splavenin za předpokladu použití konstantních rychlostí po výšce vodního sloupce. Vzhledem k zanedbání svislé složky rychlosti je tento typ výpočtu vhodný především pro mělké vody, kde jsou složky rychlosti a zrychlení ve svislém směru velmi malé ve srovnání se složkami ve směru horizontálním. [8]

Program Flo2DH využívá pro variační formulaci parciálních derivačních rovnic Galerkinovu metodu. Parciální derivační rovnice jsou touto metodou převedeny na řadu algebraických rovnic. [8]

4.2.1 Metoda vážených reziduí

Metoda vážených reziduí je jednou z technik při hledání aproximovaného řešení diferenciálních rovnic. Pro vysvětlení této metody je uvažována diferenciální rovnice pro hledanou funkci $u(x)$. [9]

$$\frac{d^2u}{dx^2} - u = -x \quad (4.1)$$

Hledáme řešení na intervalu $x \in \langle 0,1 \rangle$ s okrajovými podmínkami:

$$u(0) = 0, \quad u(1) = 0 \quad (4.2), (4.3)$$

Metoda vážených reziduí spočívá v zavedení aproximační funkce, kterou volíme tak, aby svým průběhem byla schopna vystihnout hledané řešení za splnění okrajových podmínek. Aproximační funkce obsahuje konstantu a , která je určena později. [9]

$$\bar{u} = ax(1 - x) \quad (4.4)$$

$$\bar{u}(0) = 0, \quad \bar{u}(1) = 0 \quad (4.5), (4.6)$$

Konstanta a je neznámá a je třeba ji dopočítat. Vypočítáme reziduál, tedy rozdíl v řešení mezi diferenciálními rovnicemi hledané a aproximované funkce. [9]

$$\text{DR: } 0 = \frac{d^2u}{dx^2} - u + x \quad (4.7)$$

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = a - 2ax, \quad \frac{d^2\bar{u}}{dx^2} = -2a \quad (4.8), (4.9)$$

$$R = \frac{d^2\bar{u}}{dx^2} - \bar{u} + x = -2a - ax(1 - x) + x \quad (4.10)$$

V dalším kroku je nutné dopočítat konstantu a tak, aby byl rozdíl řešení hledané a aproximované funkce co nejmenší. Volíme váhovou funkci ω a je sestaven vážený průměr reziduálu I . Pro nejpresnější odhad hledané konstanty je vážený průměr reziduálu roven nule. [9]

$$I = \int_0^1 \omega R dx = \int_0^1 \omega \left(\frac{d^2\bar{u}}{dx^2} - \bar{u} + x \right) dx = \int_0^1 \omega [-2a - ax(1 - x) + x] dx = 0 \quad (4.11)$$

Výsledné přibližné řešení se liší v závislosti na volbě váhové funkce. Program Flo2DH využívá pro svůj výpočet volbu váhové funkce podle Galerkinovy metody. U této metody je váhová funkce odvozena od tvaru zvolené aproximační funkce. [9]

$$\omega = \frac{d\bar{u}}{da} = \frac{d[ax(1-x)]}{da} = x(1 - x) = x - x^2 \quad (4.12)$$

Následně tuto podobu váhové funkce dosadíme do váženého průměru reziduálu I . [9]

$$I = \int_0^1 \omega R dx = \int_0^1 (x - x^2) \left(\frac{d^2 \bar{u}}{dx^2} - \bar{u} + x \right) dx == \int_0^1 (-2ax + ax^2 + 2ax^3 - ax^4 + x^2 - x^3) dx == \left(-a + \frac{a}{3} + \frac{a}{2} - \frac{a}{5} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) - 0 = 0 \quad (4.13)$$

Odtud vyčíslíme konstantu a . Aproximační funkci lze psát ve tvaru:

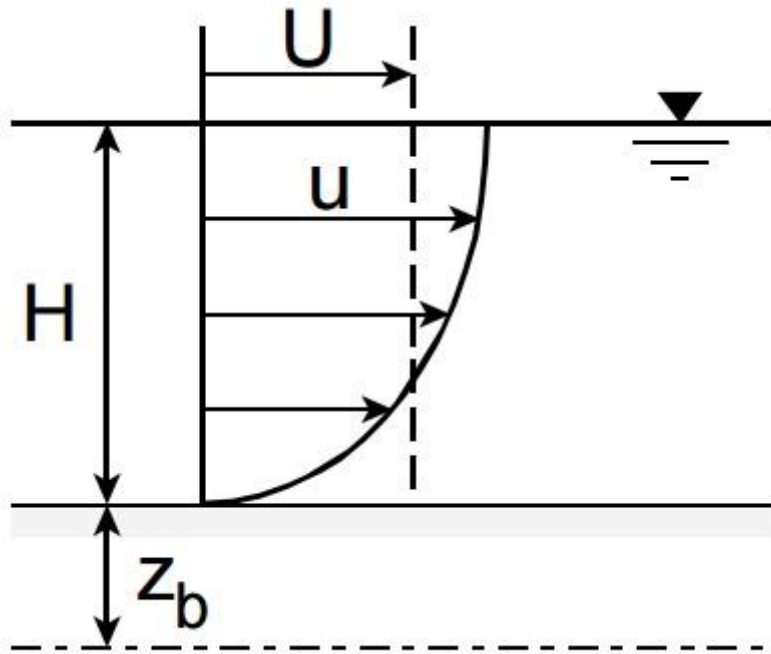
$$\bar{u} = \frac{5}{22} x(1 - x) \quad (4.14)$$

Na tomto příkladu byla vysvětlena metoda vážených reziduí Galerkinovou metodou, kterou používá program Flo2DH při výpočtech. Příklad přímo nesouvisí s výpočty v programu a má pouze informativní charakter. Pro výpočet rychlostí používá program Flo2DH kvadratickou aproximační funkci, pro výpočet hloubky vody lineární.

4.2.2 Hydrodynamické výpočty

4.2.2.1 Konstantní rychlost po výšce průřezu

Jak již bylo řečeno v předešlých kapitolách, program Flo2DH využívá pro svůj výpočet konstantní rozdělení rychlostí po výšce vodního sloupce. Popis skutečného rozdělení rychlostního pole po výšce vodního sloupce je složitý. Nejpoužívanějším teoretickým popisem je logaritmické rozdělení rychlostí pro hydraulicky drsné dno. Tvar rozdělení je patrný z následujícího obrázku, kde jsou po výšce vodního sloupce zobrazeny jednotlivé bodové rychlosti u . Průměrnou hodnotou bodových rychlostí ve vodním sloupci U je právě konstantní hodnota používaná během výpočtů v programu Flo2DH. [8]



Obrázek 4.1 Rozdělení rychlostního pole po výšce vodního sloupce [8]

$$u = \frac{dx}{dt} \quad (4.15)$$

Používaná konstantní hodnota se vyjádří jako průměrná hodnota všech bodových rychlostí ve směru osy x po výšce vodního sloupce. [8]

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} u \cdot dz \quad (4.16)$$

Pro horizontální směr y:

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (4.17)$$

Používaná konstantní hodnota se vypočte jako průměrná hodnota všech bodových rychlostí ve směru osy y po výšce vodního sloupce. [8]

$$V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} v \cdot dz \quad (4.18)$$

4.2.2.2 Řídící rovnice

Při samotném výpočtu veličin vycházíme z bilančních rovnic pro otevřený fyzikální systém. Pohyb lze charakterizovat jako dynamický, kde se kromě kinematických sil uvažuje s působením vnějších sil.

Jednotkový průtok je popsán rovnicí spojitosti. Rovnice spojitosti vyjadřuje zákon zachování hmoty pro elementární objem kapaliny.

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m \quad (4.19)$$

Předpokladem pro použití této rovnice je uvažování konstantní měrné hmotnosti vody. Zjednodušeně lze tedy říct, že uvažujeme nestlačitelnost vody.

Další řídicí rovnicí, kterou využívá program Flo2DH, je pohybová rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti.

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \alpha q_2 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \tau_{sx} - \right. \\ \left. - \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \alpha q_1 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \tau_{sy} - \right. \\ \left. - \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Rychlost po výšce vodního sloupce může být přibližně spočtena logaritickým zákonem pro hydraulicky drsné dno. Vztah mezi rychlostí a výškou daného bodu nade dnem určuje Prandtl-Kármánův univerzální zákon rozdělení rychlosti. [8]

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_b}{k} \right) \quad (4.22)$$

$$u_* = \sqrt{c_f U} \quad (4.23)$$

Pokud je rychlost po výšce vodního sloupce určena logaritickým zákonem, lze potom Boussinesqovo číslo vyjádřit takto:

$$\beta = 1 + \frac{c_f}{\kappa^2} \quad (4.24)$$

Výpočetní program Flo2DH určuje Boussinesqovo číslo následovně:

$$\beta = \beta_0 + c_\beta c_f \quad (4.25)$$

Při porovnání předchozích výrazů pro Boussinesqovo číslo vychází:

$$\beta_0 = 1, c_\beta = \frac{1}{\kappa^2} \quad (4.26), (4.27)$$

Pro většiny úloh řešící hydrauliku otevřených koryt je hodnota Karmánovy konstanty κ rovna přibližně 0,4. Hodnota koeficientu c_β je potom rovna přibližně 6,25. [8]

Program Flo2DH využívá pro výpočet výchozí hodnoty:

$$\beta_0 = 1, c_\beta = 0 \quad (4.28), (4.29)$$

Použití těchto hodnot znamená, že se při výpočtech zanedbávají svislé složky rychlosti. [8]

Hodnota Coriolisova čísla zůstává konstantní pro celý výpočet. Vzhledem k malému měřítku modelované oblasti se zanedbává vliv zemské tíže, a tedy i polohy systému vůči zemské ose.

Tečné napětí na dně je určováno podle následujících rovnic:

$$\tau_{bx} = \rho c_f m_b \frac{q_1 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{H^2}, \tau_{by} = \rho c_f m_b \frac{q_2 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{H^2} \quad (4.30), (4.31)$$

Koeficient m_b zohledňuje zvýšené tření na dně se zvyšujícím se sklonem dna. [8]

$$m_b = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial y}\right)^2} \quad (4.32)$$

$$c_f = \frac{gn^2}{H^{\frac{1}{3}}} \quad (4.33)$$

Manningův součinitel drsnosti lze v modulu FESWMS nastavit jako lineární funkci v závislosti na hloubce.

Hodnota tečného napětí na povrchu hladiny závisí na rychlosti a směru proudění větru.

$$\tau_{sx} = c_s \rho_a W^2 \cos \psi, \tau_{sy} = c_s \rho_a W^2 \sin \psi \quad (4.34), (4.35)$$

Koeficient odporu hladiny lze vyjádřit následovně:

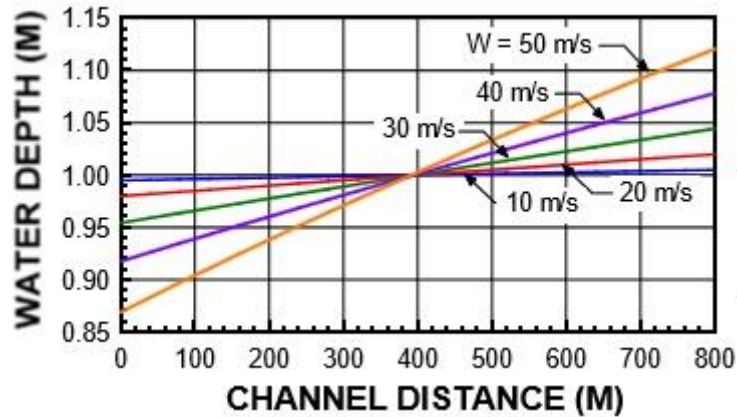
$$c_s = c_{s1} \cdot 10^{-3}; \text{ když } W \leq W_{min} \quad (4.36)$$

$$c_s = [c_{s1} + c_{s2}(W - W_{min})] \cdot 10^{-3}; \text{ když } W > W_{min} \quad (4.37)$$

Program Flo2DH používá pro výpočet výchozí hodnoty koeficientů:

$$c_{s1} = 1,0; c_{s2} = 0,0; W_{min} = 0,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.38), (4.39), (4.40)$$

Následující graf znázorňuje výškovou změnu hladiny vlivem větru v kanále s konstantním příčným profilem a délkou 800 m. Je patrné, že při rychlostech větru do 20 m/s se výšková úroveň hladiny mění na délce kanálu minimálně. [8]



Obrázek 4.2 Výškové změny hladiny při uvažování vzniku tečných napětí od větru [8]

Modelovaná oblast se nachází v údolí s velkým množstvím stromů, a tak lze předpokládat, že hodnoty rychlosti větru nepřekročí tuto hodnotu. Pro oblast Babiččina údolí tedy nemá smysl tečné napětí způsobené větrem uvažovat.

Na rozdíl od jednorozměrného proudění vody, kde Manningův součinitel drsnosti vyjadřuje jak odpory povrchu, tak i odpory proudu – především vliv turbulence, Manningův součinitel drsnosti n u dvourozměrného proudění vody vyjadřuje pouze odpor povrchu. Vliv turbulence je řešen zvlášť. [7]

$$\tau_{xx} = \rho v_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho v_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = \rho v_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (4.41), (4.42), (4.43)$$

$$v_t = (0.6 \pm 0.3) u_* H \quad (4.44)$$

Program Flo2DH vypočítává hodnotu turbulentní kinematické viskozity podle následující rovnice.

$$v_t = v_{t0} + c_{\mu 1} u_* H + c_{\mu 2} |J| \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2} \quad (4.45)$$

Důležitou součástí výpočtu je přepad vody přes klapkový jez ve Zlíči. Tento jev je řešen přepadovou rovnicí.

$$Q = K_w(z_w^h - z_{wc})^{1,5} \quad (4.46)$$

Součinitel jezu K_w je funkcí délky přelivné hrany a dalších součinitelů C_s a C_w , které popisují tvar přelivu a případné ovlivnění přepadu vody přes přeliv při zatopení přelivu dolní vodou. [8]

$$K_w = C_s C_w \sqrt{g} L_w \quad (4.47)$$

$$C_s = (1 - Y_t^{a_{sub}})^{b_{sub}} \quad (4.48)$$

$$Y_t = \frac{z_w^t - z_{wc}}{z_w^h - z_{wc}} \quad (4.49)$$

Pro ostrohranný přeliv odpovídající klapkovému jezu ve Zlíči používá program Flo2DH výchozí hodnoty:

$$C_w = 0,544; a_{sub} = 1,5; b_{sub} = 0,385 \quad (4.50), (4.51), (4.52)$$

5 VYTVOŘENÍ MODELU

5.1 Geodetické podklady

Při řešení modelování dvourozměrného proudění vody byl použit digitální model reliéfu (DMR) 5. generace. Výhoda digitálního modelu 5. generace oproti modelu 4. generace spočívá v eliminaci chyb zobrazení povrchu způsobených ortogonálním rozdělením bodů. Síť modelu 5. generace je tvořena množinou bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti, která charakterizuje změny reliéfu. Ze sítě jsou tak dobře patrné všechny terénní nerovnosti.

Digitální model reliéfu 5. generace je produktem ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální). Každý bod sítě je charakterizován polohopisnými souřadnicemi [X, Y] v systému S-JTSK a výškopisnou souřadnicí H v systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou 0,18 m v odkrytém terénu a 0,30 m v zalesněném terénu. DMR 5. generace vznikl z dat pořízených během leteckého laserového skenování [10].

Pro řešené území byly použity mapové listy Náchod 8-0, Náchod 8-1, Náchod 9-0 a Náchod 9-1. Každý list představuje území $2,5 \times 2,0$ km.

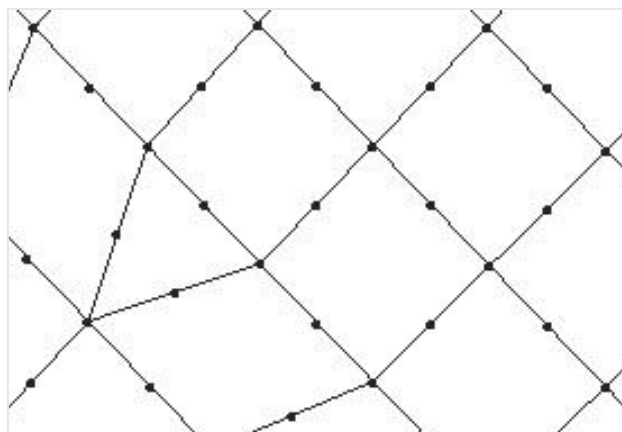
Problém digitálního modelování reliéfu představují vodní plochy. Vodní hladina zabraňuje zachycení terénu pod vodou při leteckém laserovém skenování. Model terénu pod vodními plochami je tak nutné získat jiným způsobem. Nejčastějším způsobem je tachymetrické zaměření.

Tvar terénu koryta řeky Úpy a Úpského přivaděče byl získán z tachymetrického zaměření příčných profilů.

5.2 Sestavení výpočetní sítě

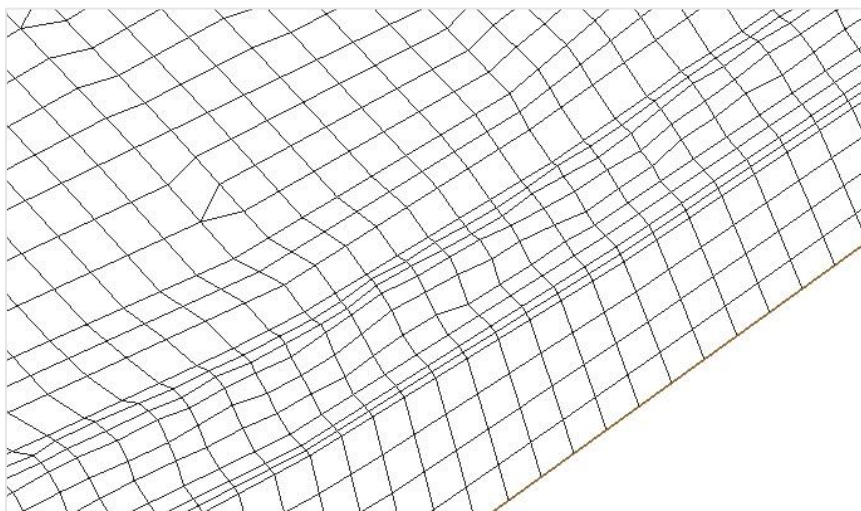
5.2.1 Parametry výpočetní sítě

Sestavená výpočetní síť tvoří 127 141 výpočetních bodů. Každý bod je charakterizován souřadnicemi [X, Y, H]. Z výpočetních bodů je sestaveno 42 771 elementů, z nichž je 39 882 čtyřúhelníkového a 2 889 trojúhelníkového tvaru. Čtyřúhelníkový element se skládá z osmi bodů, trojúhelníkový ze šesti. Rozměry elementů byly voleny podle charakteru povrchu. Čím menší velikosti rozměrů elementu jsou voleny, tím řešení nabývá větší přesnosti. Vymodelovaný povrch poté přesněji odpovídá skutečnému povrchu.



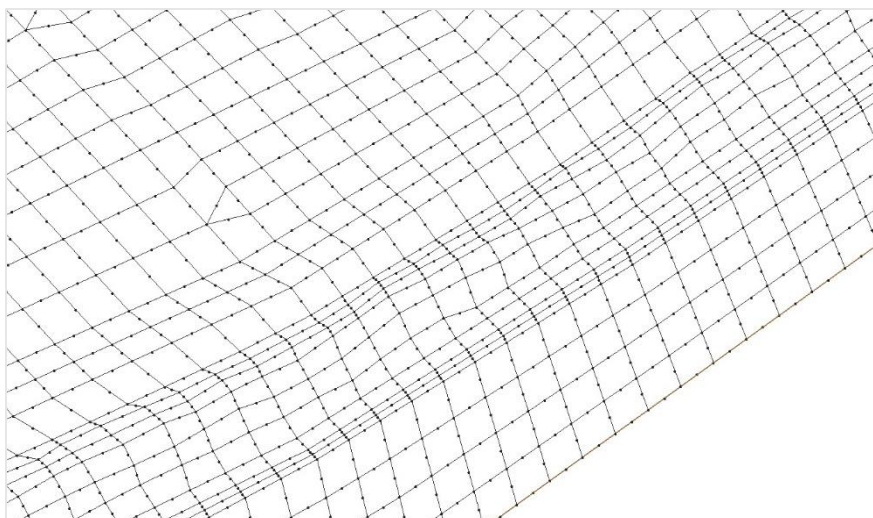
Obrázek 5.1 Čtyřúhelníkový a trojúhelníkový element

Rozměry elementů v inundačním území nejsou větší než 6 metrů. Inundační území je převážně tvořeno rozsáhlými loukami s malým výškovým rozdílem. Koryto řeky Úpy je tvořeno čtyřúhelníkovými elementy s ohledem na směr proudění vody. Rozměry elementů v příčném směru koryta nejsou na svazích větší než 1 m. Svahy koryta řeky Úpy jsou velmi strmé. Dno koryta je ploché, rozměry elementů jsou v příčném směru větší. V podélném směru koryta je rozměr elementů větší avšak maximálně 5 m.



Obrázek 5.2 Ukázka výpočetní sítě – elementy

Při samotném výpočtu v programu Flo2DH jsou řídicími rovnicemi (rovnice kontinuity a rovnice hybnosti) vypočítány všechny elementy. Výsledkem výpočtu je hloubka vody a vektory rychlosti ve směru os x a y v každém výpočetním bodě.



Obrázek 5.3 Ukázka výpočetní sítě - elementy a body

5.2.2 Určení odporu povrchu

Odpor povrchu koryta řeky Úpy a území inundace proti proudění lze vyjádřit Manningovým součinitelem drsnosti. Manningův součinitel drsnosti n je veličina charakterizující typ povrchu. Přesné určení hodnoty součinitele je velmi složité. Používá se několik metod – určení pomocí katalogu fotografií s různými typy koryt, kde byla měření určena přesná hodnota Manningova součinitele, nebo výpočtem ze známých hodnot jednotlivých materiálů.

5.2.2.1 Určení hodnoty Manningova součinitele drsnosti koryta řeky Úpy

Hodnota Manningova součinitele drsnosti koryta řeky Úpy byla určena odhadem. Dno je tvořeno organickým materiálem a anorganickým materiálem různé frakce. Zrna jsou rozměrově velmi rozmanitá. Vyskytují se zde jak malá zrna s velikostí v řádech mm, tak i velké kameny až 50 cm dlouhé. Na dně se často vyskytují dlouhé podvodní řasy. Pro dno koryta byla zvolena hodnota $n = 0,035$. Svahy koryta jsou poměrně příkré a jsou zpevněny vzrostlými stromy. Hodnota Manningova součinitele drsnosti pro svahy koryta byla zvolena 0,060.

5.2.2.2 Určení hodnot Manningova součinitele drsnosti pro povrchy oblasti inundace

Hodnota Manningova součinitele drsnosti byla pro oblast lesu určena pomocí fotografické metody.



Obrázek 5.4 Fotografie inundačního území s určenou hodnotou Manningova součinitele drsnosti [11]



Obrázek 5.5 Fotografie inundačního území Babiččina údolí

Lesní porost na obou obrázcích je velmi podobný. Horní obrázek je z katalogu fotografií lesních porostů, pro které byla spočítána hodnota Manningova součinitele drsnosti.

Vzhledem k podobnosti porostů lze tedy použít hodnotu Manningova součinitele drsnosti i pro oblast lesů v Babiččině údolí.

Les $n = 0,100$

Pro určení hodnot Manningova součinitele drsnosti dalších materiálů nebyla použita fotografická metoda, ale konečná hodnota odporu povrchu je rovna základní hodnotě materiálu.

Další materiály vyskytující se v řešeném území:

Materiál	Manningův součinitel drsnosti n
Asfalt	0,016
Beton	0,015
Kamenná dlažba	0,025
Křoviny	0,100
Louka	0,028
Štěrka	0,020
Tráva	0,025
Vysekané křoví	0,040

Tabulka 5.1 Hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro materiály na území inundace

5.3 Počáteční a okrajové podmínky

Jako okrajové podmínky se při výpočtech volí hodnota průtoku v horním profilu modelované oblasti (profil, kde voda do modelu vtéká) a úroveň hladiny vody v dolním profilu modelované oblasti (profil, kde voda z modelu vytéká). Vzhledem k řešení ustáleného stavu nerovnoměrného proudění lze považovat průtok v modelu za časově neměnný.

Hodnota průtoku v horní okrajové podmínce v profilu řeky Úpy, ř. km 16,130 odpovídá povodňovému průtoku Q_{100} . Hodnota průtoku je $256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro profil v jezu ve Zlíči. Při modelování není uvažováno s žádnými dalšími přítoky v modelované oblasti ani se srážkovým úhrnem vztaženým k ploše modelované oblasti při návrhovém dešti. Profil, kde voda do modelu vtéká, je pouze jeden.

Dolní okrajové podmínky jsou dvě. První se nachází v profilu přivaděče ř. km 0,310, asi 300 m od vyústění přivaděče do vodní nádrže Rozkoš. Úroveň hladiny vody v profilu je

závislá na úrovni hladiny ve vodní nádrži Rozkoš. Ta může kolísat mezi hodnotami 280,50 m n. m. a 282,60 m n. m. Menší hodnota odpovídá kótě hladiny stálého nadržení nádrže, větší kótě při naplnění ovladatelného ochranného prostoru nádrže. Při úrovni vodní hladiny v nádrži na kótě stálého nadržení nedochází k ovlivnění proudění vody v přivaděči.

Kóty hladin v profilu ř. km 0,310 byly převzaty z výsledků jednorozměrného matematického modelování proudění vody. Úroveň hladiny v profilu je při hladině, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči, na kótě 282,30 m n. m. V případě naplnění ovladatelného ochranného prostoru nádrže je kóta hladiny v profilu na 282,70 m n. m.

Úroveň hladiny v druhé dolní okrajové podmínce na řece Úpě, ř. km 13,313 byla také převzata z výsledků jednorozměrného matematického modelování dané oblasti. Úroveň hladiny se mění podle velikosti průtoku. Hladina tedy byla určena na základě probíhajících výpočtů.

Následující tabulka znázorňuje kóty hladin při jednotlivých povodňových průtocích z výsledků jednorozměrného matematického modelování.

	Povodňové průtoky	Kóta hladiny v dolní okrajové podmínce
Q_N	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	[m n. m.]
Q_5	109	278.8
Q_{50}	217	279
Q_{100}	256	279.2

Tabulka 5.2 Kóty hladin v dolní okrajové podmínce řeky Úpy

Změna kót hladin v řádech centimetrů v dolních okrajových podmínkách nemá vliv na rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu. Modelovaná oblast byla zvolena v dostatečně velikosti pro eliminaci chyb v případě zvolení ne zcela přesných úrovní hladin.

5.4 Verifikace a kalibrace modelu

Nedílnou součástí tvorby matematického modelu je jeho verifikace. Verifikace modelu spočívá v porovnání hodnot úrovní hladiny vody z matematického modelování s reálnou zaměřenou hodnotou. Především hodnoty odporu povrchu mají pouze orientační charakter. K povrchům jsou přidělovány na základě určité podoby jednotlivých materiálů a na základě zkušeností řešitele. Pokud se hodnoty výšek hladin liší, následuje proces kalibrace modelu, při němž se mění hodnoty odporu povrchu tak, aby byly rozdíly

minimální. Následně se porovnají úrovně hladiny vody při jiném průtočném množství. Pokud jsou i tyto hodnoty stejné, je model verifikován a zkalibrován.

Vzhledem k faktu, že se po rekonstrukci rozdělovacího objektu v roce 2007 nevyskytla povodeň v takové míře, která by ověřila funkčnost objektu, je verifikace a následná kalibrace velice obtížná. Při povodni v roce 2013 zůstala voda v korytě řeky Úpy a pouze malé množství se vytilo do pravostranné inundace na louku před inundačním přelivem. Model byl verifikován podle této povodně s maximálním průtočným množstvím $Q = 133 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Úrovně hladin byly určeny na základě fotografické dokumentace povodně (Příloha 1) a videí z internetu. Z fotografií je patrné, že při povodni v červnu 2013 došlo k zatopení Ludrova mlýnu a mandlu. K žádným dalším materiálním škodám v modelované oblasti nedošlo. Do vodní nádrže Rozkoš byl převáděn průtok kolem $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (odhadnuté množství) při maximálním průtočném množství $Q = 133 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Průtok $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zůstával podle manipulačního řádu v korytě řeky Úpy.

Ověření hodnot součinitelů drsnosti materiálů v inundaci nebylo možné. Výpočty tak nelze považovat za zcela přesné a při vyhodnocování výsledků je třeba uvažovat chybu.

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hydraulická studie rozdělovacího objektu byla provedena pro dva stavy při návrhové povodni Q_{100} . Ocelová dutá klapka na jezu ve Zlíči je při prvním stavu plně vztyčena na kótu 282,95 m n. m. Úplným vztyčením klapky je zajištěno maximální možné vzduť vody před jezem a tedy maximální možný odtok části průtočného množství do přivaděče a dále do vodní nádrže Rozkoš. Kóta v příčném profilu přivaděče ř. km 0,310 se pohybuje mezi dvěma hodnotami. Vodní hladina v nádrži se pohybuje mezi hodnotami kóty stálého nadržení nebo kóty ochranného ovladatelného prostoru, kdy dochází k ovlivnění proudění vody v přivaděči. Pro oba tyto extrémy byl proveden výpočet. Hladina v příčném profilu přivaděče ř. km 0,310 je v první variantě na kótě 282,30 m n. m., v druhé na kótě 282,70 m n. m.

Úroveň hladiny v druhé dolní okrajové podmínce na řece Úpě ř. km 13,313 je při obou variantách vztyčené klapky na jezu 278,80 m n. m. Velikost průtoku při modelování v této okrajové podmínce přibližně odpovídá velikosti povodňového průtoku Q_5 . Okrajové podmínce byla přiřazena úroveň hladiny z výsledků jednorozměrného matematického modelování.

Druhý stav řeší rozdělení průtoků v rozdělovacím objektu při položené klapce. Klapka se při povodních sklopí, pokud má veškerý průtok zůstat v korytě a v inundaci řeky Úpy a žádná jeho část nemá směřovat do vodní nádrže Rozkoš. Tento stav nastává v případě, kdy je ochranný ovladatelný prostor ve vodní nádrži Rozkoš naplněn, a není tedy možné přivádět další množství vody. Kóta úrovně vodní hladiny v nádrži je na kótě 282,60 m n. m. S ohledem na průběh výpočtů a úrovně hladiny vody nad jezem ve Zlíči byla zvolena hladina v příčném profilu přivaděče ř. km 0,310 282,70 m n. m. Kóta hladiny v druhé dolní okrajové podmínce na řece Úpě ř. km 13,313 byla zvolena 279,00 m n. m. Velikost průtoku při modelování v této okrajové podmínce přibližně odpovídá velikosti povodňového průtoku Q_{50} .

Program SMS umožňuje prezentaci výsledků v grafické formě pomocí tematických map. Tematické mapy znázorňují rozdělení výškových úrovní terénu, vodní hladiny a hloubky vody. Dále mohou znázornit rozdělení svislicových rychlostí a lze přidat i jejich vektory.

Hlavní funkce rozdělovacího objektu je, jak již název napovídá, rozdělovat průtoky. Povodňový průtok je rozdělen mezi území inundace, jez ve Zlíči a přivaděč. Podle dosavadního návrhu má být průtok Q_{100} o hodnotě $256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ rozdělen následovně:

- Území inundace: $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Jez ve Zlíči: $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Přivaděč: $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Varianta s plně vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n.m. a úrovní hladiny vody v nádrži, která neovlivňuje proudění vody v přivaděči, řešená v programu SMS s matematickým modulem FESWMS s výpočetním programem Flo2DH rozděluje povodňový průtok $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ následovně:

- Inundační přeliv: $43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Jez ve Zlíči: $86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Přivaděč: $127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

	Návrhové hodnoty průtoků	Výsledný průtok modelování	Rozdíl	Rozdíl
Objekt	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	[%]
Inundační přeliv	26	43	17	65.4
Jez ve Zlíči	80	86	6	7.5
Přivaděč	150	127	-23	-15.3

Tabulka 6.1 Porovnání návrhových průtoků s výslednými průtoky modelování - kóta hladiny v nádrži neovlivňuje proudění vody v přivaděči

Z výsledků vyplývá:

- průtok přes inundační přeliv je větší o více než 65 % než podle návrhu,
- přivaděčem je převáděno menší průtočné množství, než je navrženo, a to o více než 15 %,
- v korytě a inundaci řeky Úpy zůstává průtočné množství $129 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je o $23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ více než podle návrhu – tento fakt bude mít za následek vznik materiálních škod v obcích od České Skalice po Jaroměř,
- průtočné množství pod jezem ve Zlíči je o $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ větší než návrhový neškodný průtok.

Stav s plně vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. a úrovní hladiny vody v nádrži na kótě ochranného ovladatelného prostoru 282,60 m n. m. řešený v programu SMS s matematickým modulem FESWMS s výpočetním programem Flo2DH rozděluje povodňový průtok $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ následovně:

- Inundační přeliv: $44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Jez ve Zlíči: $87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Přivaděč: $125 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

	Návrhové hodnoty průtoků	Výsledný průtok modelování	Rozdíl	Rozdíl
Objekt	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	[%]
Inundační přeliv	26	44	18	69.2
Jez ve Zlíči	80	87	7	8.8
Přivaděč	150	125	-25	-16.7

Tabulka 6.2 Porovnání návrhových průtoků s výslednými průtoky modelování - kóta hladiny v nádrži 282,60 m n.m.

Výsledky jsou velmi podobné těm z předchozí varianty. Hlavním rozdílem je o $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zmenšený průtok přivaděčem. Zde je patrný vliv úrovně hladiny vody v nádrži na funkci rozdělovacího objektu.

Jak je patrné z tematických map výškových úrovní vodní hladiny, pouze v jednom výpočetním bodě varianty s kótou hladiny v nádrži 282,60 m n.m. dochází k přelití navýšené zdi na horní části pravého pilíře jezu, a to pouze o 2 cm. U varianty, kdy voda v nádrži neovlivňuje proudění vody v přivaděči, nedochází k přelití navýšené zdi na horní části pilířů jezu. Dolní části pilířů jsou u obou variant zatopeny. Těleso obslužné lávky spojující břehy přivaděče je celé nad hladinou a neovlivňuje proudění vody.

Vzhledem k faktu, že přivaděč je navržen na průtok $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a výsledný průtok modelování je $125 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respektive $127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, není kapacita přivaděče plně využita a nedochází k vylití vody mimo těleso přivaděče.

Stav se sklopenou klapkou na jezu ve Zlíči a úrovní hladiny vody v nádrži na kótě ochranného ovladatelného prostoru 282,60 m n. m řešený v programu SMS s matematickým modulem FESWMS s výpočetním programem Flo2DH rozděluje povodňový průtok $Q_{100} = 256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ takto:

- Inundační přeliv: $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Jez ve Zlíči: $206 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Přivaděč: $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Z výsledků vyplývá, že přítok přivaděčem do vodní nádrže Rozkoš $Q = 31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je větší než maximální neškodný odtok z nádrže $Q = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Rozkošským potokem. Spodními výpustěmi v tělese hlavní hráze vodní nádrže Rozkoš lze vypouštět maximální průtočné množství $Q = 37,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzhledem k absenci bezpečnostního přelivu se jedná o jediný možný způsob vypouštění nádrže při povodních. Velikost odtoku ($37,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je stále větší než velikost přítoku ($31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a nedojde tak k plnění nádrže nad kótu ochranného prostoru. Odtok z nádrže větší než neškodný průtok způsobí materiální škody v území podél Rozkošského potoka.

V korytě a inundaci řeky Úpy zůstane při stavu se sklopenou klapkou $235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což způsobí značné materiální škody v obcích od České Skalice po Jaroměř.

V modelované oblasti dojde při návrhové povodni u všech variant k zatopení lokální zástavby Ludrova mlýnu a mandlu. Ludrův mlýn byl zatopen i při povodni v červnu 2013, kdy bylo naměřeno maximální průtočné množství $Q = 133 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tedy skoro poloviční než návrhová povodeň pro rozdělovací objekt. Další lokální zástavba, Lovecký pavilon, zůstane vodou nedotčena. Žádné další budovy se v modelované oblasti nenacházejí.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo ověření funkčnosti rozdělovacího objektu vodního díla Rozkoš na řece Úpě využitím dvourozměrného matematického modelování.

Pro práci byl využit software SMS (Surface-water Modelling System) s matematickým modelem FESWMS (Finite Element Surface Water Modelling System), založeným na metodě konečných prvků. Samotný výpočet probíhal ve výpočetním programu Flo2DH. Průtok pro modelování byl zvolen stejný jako návrhový průtok pro rozdělovací objekt. Modelování bylo řešeno pro ustálený stav, průtočné množství je v čase neměnné.

Výsledné hodnoty dvourozměrného matematického modelování neodpovídají hodnotám jednorozměrného matematického modelování, které byly použity při návrhu a realizaci rozdělovacího objektu. Při návrhové povodni Q_{100} nedochází k rozdělení průtoku mezi jez ve Zlíči, přivaděč a inundační přeliv podle předpokladu.

Při plně vztyčené klapce na jezu ve Zlíči není kapacita přivaděče plně využita a v korytě řeky Úpy zůstává větší průtočné množství, než se předpokládalo, což má za následek zvýšení průtoku na hodnotu větší, než je neškodný průtok v obcích od České Skalice po Jaroměř. Přes inundační přeliv proudí větší množství vody než podle návrhu. Nadjezí jezu ve Zlíči není kapacitní pro průtok $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a už při menším průtoku $212 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dochází k přelítí navýšené zdi na horní části pravého pilíře.

Při sklopené klapce na jezu ve Zlíči a povodňovém průtoku Q_{100} proudí přivaděčem $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při naplnění ochranného ovladatelného prostoru nádrže je zapotřebí tento průtok vypouštět z nádrže spodními výpustěmi, tak aby nedocházelo k dalšímu plnění nádrže. Přehrada není vybavena bezpečnostním přelivem, a vznikalo by tak značné riziko při dalším plnění nádrže. Neškodný průtok v Rozkošském potoce má hodnotu $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, takže v případě vypuštění $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ z nádrže spodními výpustěmi vzniknou materiální škody v území podél potoka.

8 LITERATURA

- [1] POVODÍ LABE, státní podnik. Přehrada Rozkoš na Rozkošském potoce v ř. km 3,590. © Povodí Labe, státní podnik [cit. 2016-04-06]. Dostupné z:
http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/prehrada_rozkos.pdf.
- [2] POVODÍ LABE, státní podnik. Manipulační řád pro vodní dílo Rozkoš. 06/2007 revize 12/2012.
- [3] POVODÍ LABE, státní podnik. Projektová dokumentace pro územní řízení VD Rozkoš – zvýšení ochranné funkce nádrže. 04/2004.
- [4] MAPY.CZ, © Seznam.cz, a.s. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z:
<https://mapy.cz/zemepisna>
- [5] ŘÍHA, Jaroslav. Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. Vysoké učení technické v Brně. 1997. 185 s. ISBN 80-214-0827-8.
- [6] HAVLÍK, Vladimír aj. Matematické modelování neustáleného proudění. Ediční středisko ČVUT. 1992. 223 s. ISBN 80-01-00765-2.
- [7] HAVLÍK, Aleš. Matematické modelování proudění vody s volnou hladinou [online prezentace]. ČVUT v Praze: Inovace bakalářského programu Stavební inženýrství pro posílení profesního zaměření absolventů [cit. 2016-04-10]. Dostupný z:
http://www.bakalarsi.cz/data/KA2/vystupy/prednasky/Matematicke_modelovani_Havlik.pdf.
- [8] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. User's Manual for FESWMS FST2DH. Release 3. 09/2002 aktualizace 10/2003.
- [9] SZWEDA, Jan, Zdeněk PORUBA, Roman SIKORA, Ondřej FRANTIŠEK, Matematika v pozadí řešení inženýrských úloh [online], © Szweda Jan, Poruba Zdeněk, Sikora Roman, František Ondřej 2012 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z:
http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mat_v_pozadi_reseni_ing_uloh.pdf
- [10] ČÚZK, Geoportál ČÚZK [online], © 2010 [cit. 2016-03-14]. 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)

[11] SCHNEIDER, V.R. a G.J. ARCEMENT, Jr. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains WSP2339 [online], © [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf>

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Tematické mapy

Příloha 1 - Ortofotomapa modelované oblasti.....	45
Příloha 2 - Mapa výškových úrovní terénu modelované oblasti	46
Příloha 3 - Mapa svislicových rychlostí pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči	47
Příloha 4 - Mapa úrovní hladiny pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči	48
Příloha 5 - Mapa hloubek vody pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči	49
Příloha 6 - Mapa svislicových rychlostí pro variantu se sklopenou klapkou	50
Příloha 7 - Mapa úrovní hladiny pro variantu se sklopenou klapkou.....	51
Příloha 8 - Mapa hloubek vody pro variantu se sklopenou klapkou	52

Příloha B – Fotodokumentace

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Přehledná situace vodního díla Rozkoš [4].....	4
Obrázek 2.2 Jez ve Zlíči (pohled proti proudu).....	7
Obrázek 2.3 Zemní hrázka s asfaltovou cyklostezkou	8
Obrázek 2.4 Pravobřežní inundační přeliv	8
Obrázek 2.5 Úpský přivaděč v obci Zlích	10
Obrázek 2.6 Přehledná situace řešené oblasti [4].....	11
Obrázek 2.7 Přehledná situace modelované oblasti [4].....	12
Obrázek 3.1 Ortogonální síť metody konečných diferencí [5].....	15
Obrázek 4.1 Rozdělení rychlostního pole po výšce vodního sloupce [8]	20
Obrázek 4.2 Výškové změny hladiny při uvažování vzniku tečných napětí od větru [8]...	23
Obrázek 5.1 Čtyřúhelníkový a trojúhelníkový element.....	26
Obrázek 5.2 Ukázka výpočetní sítě – elementy	26
Obrázek 5.3 Ukázka výpočetní sítě - elementy a body	27
Obrázek 5.4 Fotografie inundačního území s určenou hodnotou Manningova součinitele drsnosti [11].....	28
Obrázek 5.5 Fotografie inundačního území Babiččina údolí	28

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 5.1 Hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro materiály na území inundace	29
Tabulka 5.2 Kóty hladin v dolní okrajové podmínce řeky Úpy	30
Tabulka 6.1 Porovnání návrhových průtoků s výslednými průtoky modelování - kóta hladiny v nádrži neovlivňuje proudění vody v přivaděči	33
Tabulka 6.2 Porovnání návrhových průtoků s výslednými průtoky modelování - kóta hladiny v nádrži 282,60 m n.m.	34

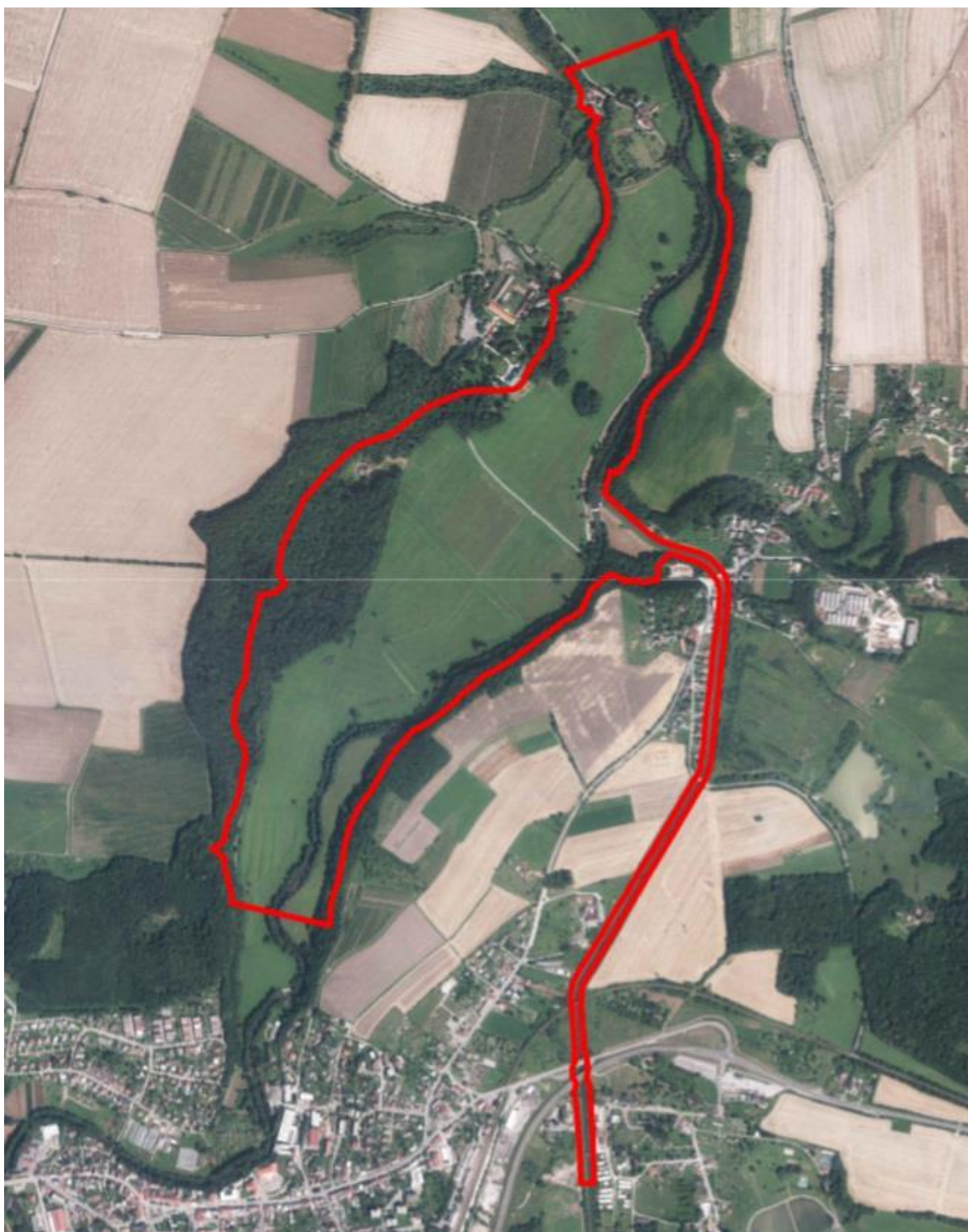
12 SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Definice	Jednotka
a	konstanta	[-]
a _{sub}	konstanta	[-]
b _{sub}	konstanta	[-]
c _f	konstanta dnového tečného napětí	[-]
c _s	konstanta tečného napětí na hladině	[-]
c _{s1}	konstanta	[-]
c _{s2}	konstanta	[-]
c _β	konstanta	[-]
c _{μ1}	konstanta	[-]
c _{μ2}	konstanta	[-]
C _s	součinitel zatopení	[-]
C _w	konstanta	[-]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
H	hloubka proudění	[m]
H _{i,j}	piezometrická výška v uzlu	[m]
I	vážený průměr reziduálu	
J	determinant Jacobiho matice	[-]
k	hydraulická drsnost	[m]
K _w	koeficient jezu	[-]
L _w	délka přelivné hrany	[m]
m	dílčí součinitel zohledňující meandrování koryta	[-]
m _b	faktor pro zvýšené napětí vlivem sklonu dna	[-]
n	Manningův součinitel drsnosti	[-]
n _b	základní hodnota Manningova součinitele drsnosti pro přímé, rovnoměrné a plynulé koryto tvořené přírodními materiály	[-]
n ₁	dílčí součinitel zohledňující nepravidelnosti povrchu koryta	[-]
n ₂	dílčí součinitel zohledňující změny příčného průřezu	[-]
n ₃	dílčí součinitel zohledňující vliv překážek	[-]
n ₄	dílčí součinitel zohledňující vegetaci	[-]
p _a	atmosférický tlak na vodní hladině	[Pa]

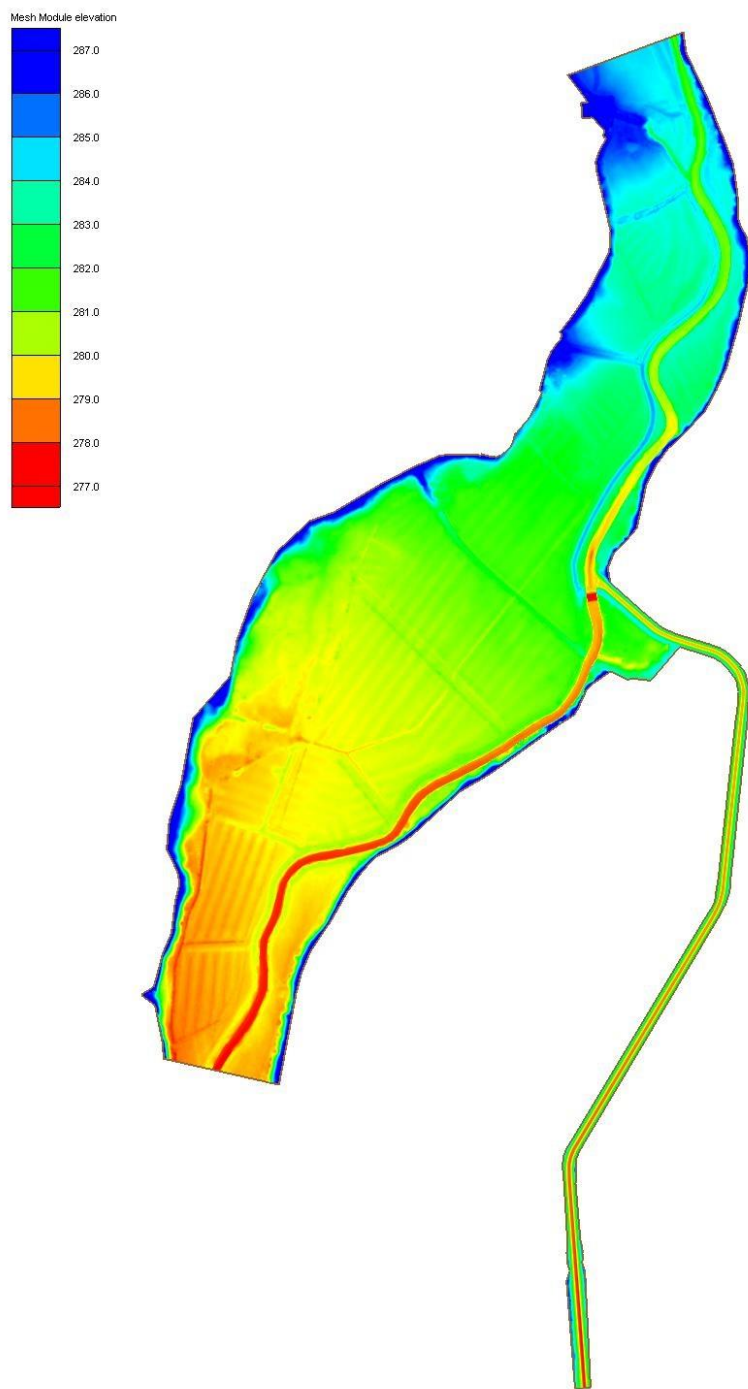
q_1, q_2	měrný průtok ve směru os x a y	$[m^2.s^{-1}]$
q_m	celková změna průtoku elementu	$[m^2.s^{-1}]$
Q_w	průtok přes přeliv	$[m^3.s^{-1}]$
R	reziduál	
t	čas	[s]
u, v	bodové rychlosti proudění ve směru os x a y	$[m.s^{-1}]$
u^*	třecí rychlost u dna	$[m.s^{-1}]$
$u(x)$	funkce	
\bar{u}	aproximační funkce	
U, V	průměrné svislicové rychlosti proudění ve směru os x a y	$[m.s^{-1}]$
ν_t	průměrná turbulentní kinematická viskozita	$[m^2.s^{-1}]$
ν_0	základní turbulentní kinematická viskozita	$[m^2.s^{-1}]$
W	charakteristická rychlost větru u hladiny	$[m.s^{-1}]$
W_{min}	konstanta	$[m.s^{-1}]$
w	váhová funkce	
x, y, z	prostorové souřadnice	[m]
x	proměnná	
Y_t	poměr hladin v nadjezí a podjezí	[-]
z_b	kóta dna	[m]
z_w	kóta vodní hladiny	[m]
z_w^h	kóta vodní hladiny v nadjezí	[m]
z_w^t	kóta vodní hladiny v podjezí	[m]
z_{wc}	kóta přelivné hrany	[m]
α	Coriolisovo číslo	[-]
β	Boussinesqovo číslo	[-]
β_0	konstanta	[-]
κ	Kármánova konstanta	[-]
ρ	hustota	$[kg.m^{-3}]$
τ_{bx}, τ_{by}	tečné napětí na dně ve směru os x a y	[Pa]
τ_{sx}, τ_{sy}	tečné napětí na povrchu hladiny ve směru os x a y	[Pa]
$\tau_{xx}, \tau_{xy},$	tečná napětí vlivem turbulence	[Pa]
τ_{yx}, τ_{yy}		

ψ	úhel mezi směrem větru a kladnou osou x	[rad]
∂	symbol parciální derivace	

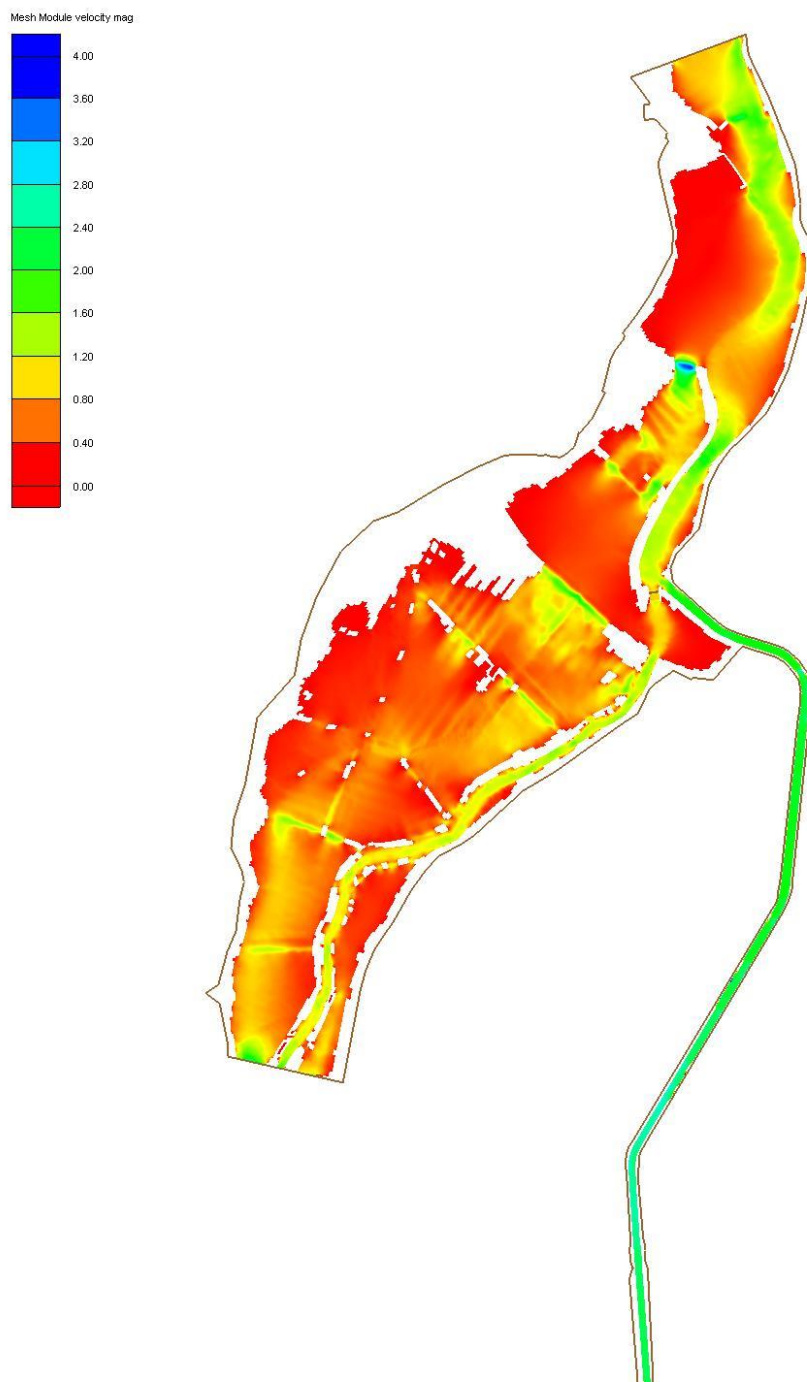
Příloha A – Tematické mapy



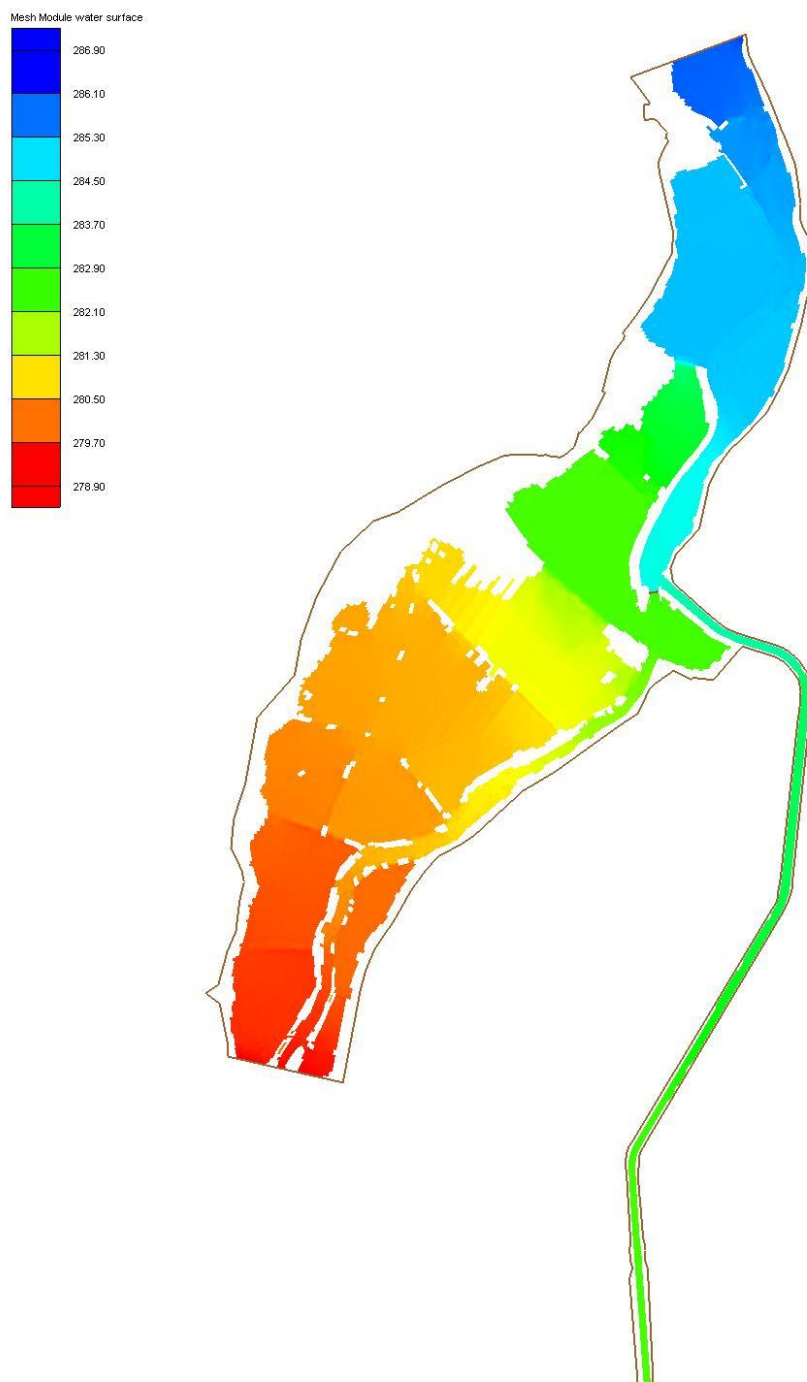
Příloha 1 - Ortofotomapa modelované oblasti



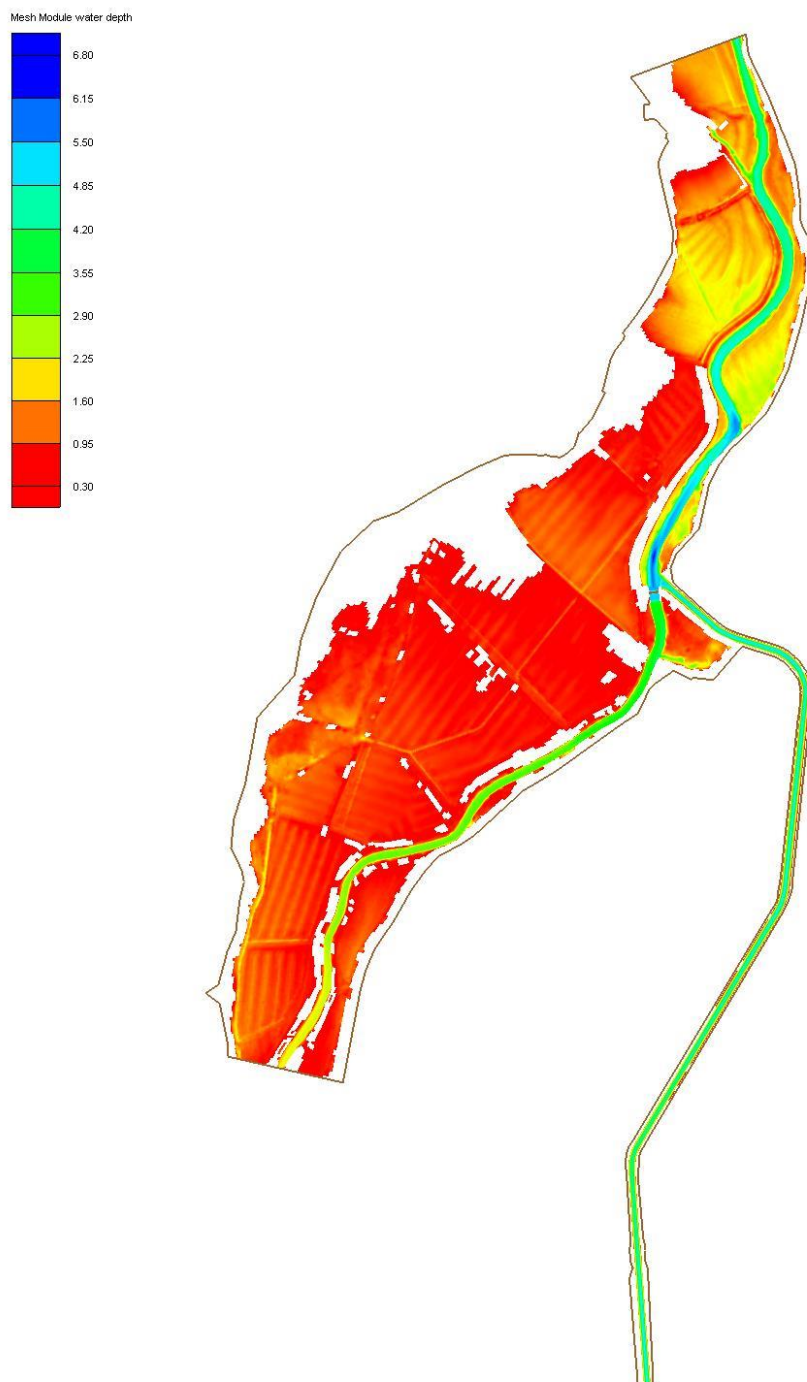
Příloha 2 - Mapa výškových úrovní terénu modelované oblasti



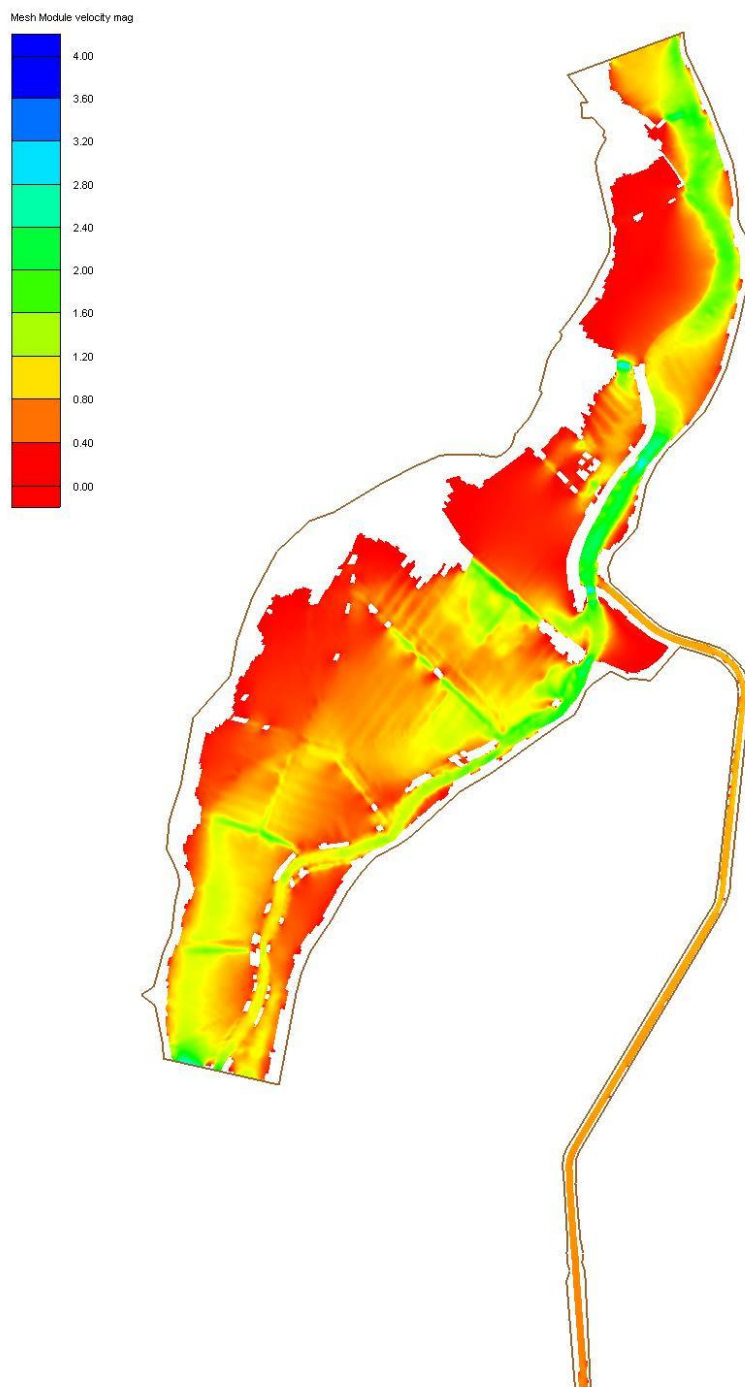
Příloha 3 - Mapa svislicových rychlostí pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči



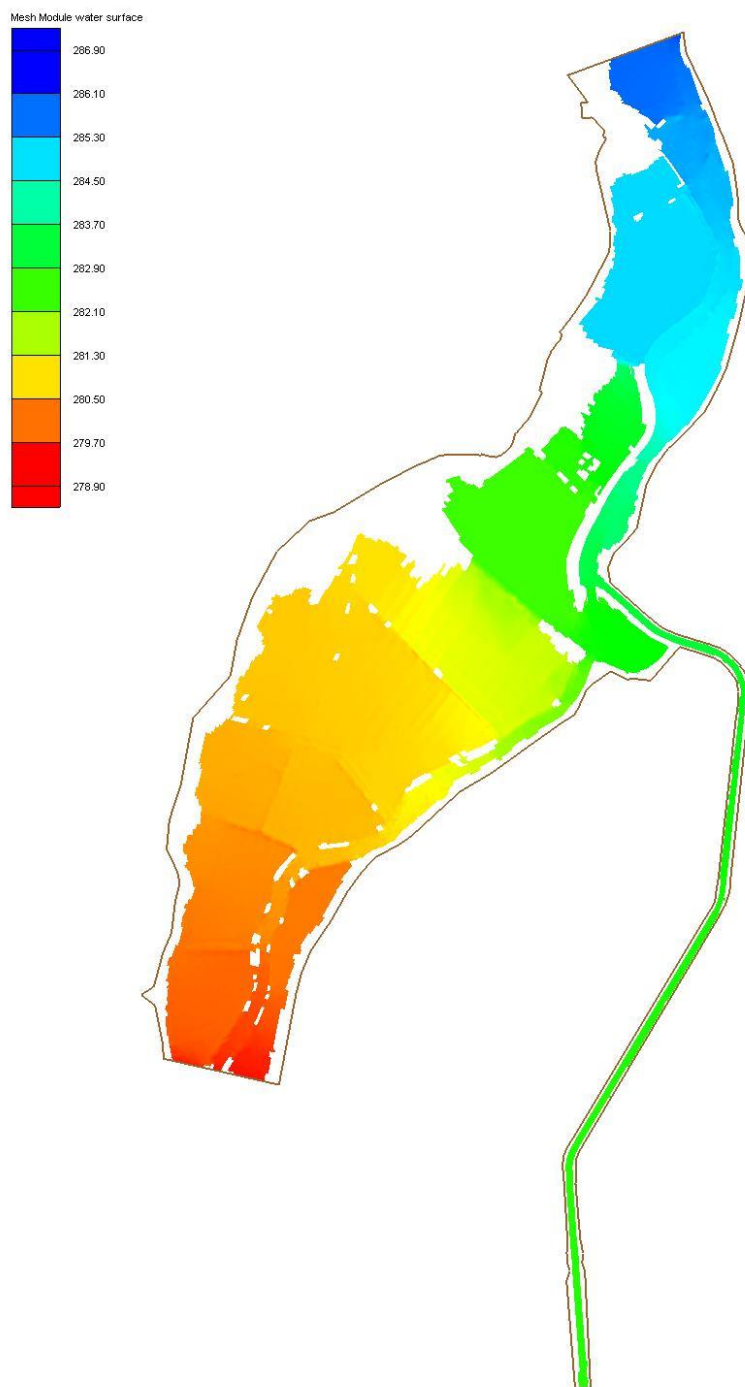
Příloha 4 - Mapa úrovní hladiny pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči



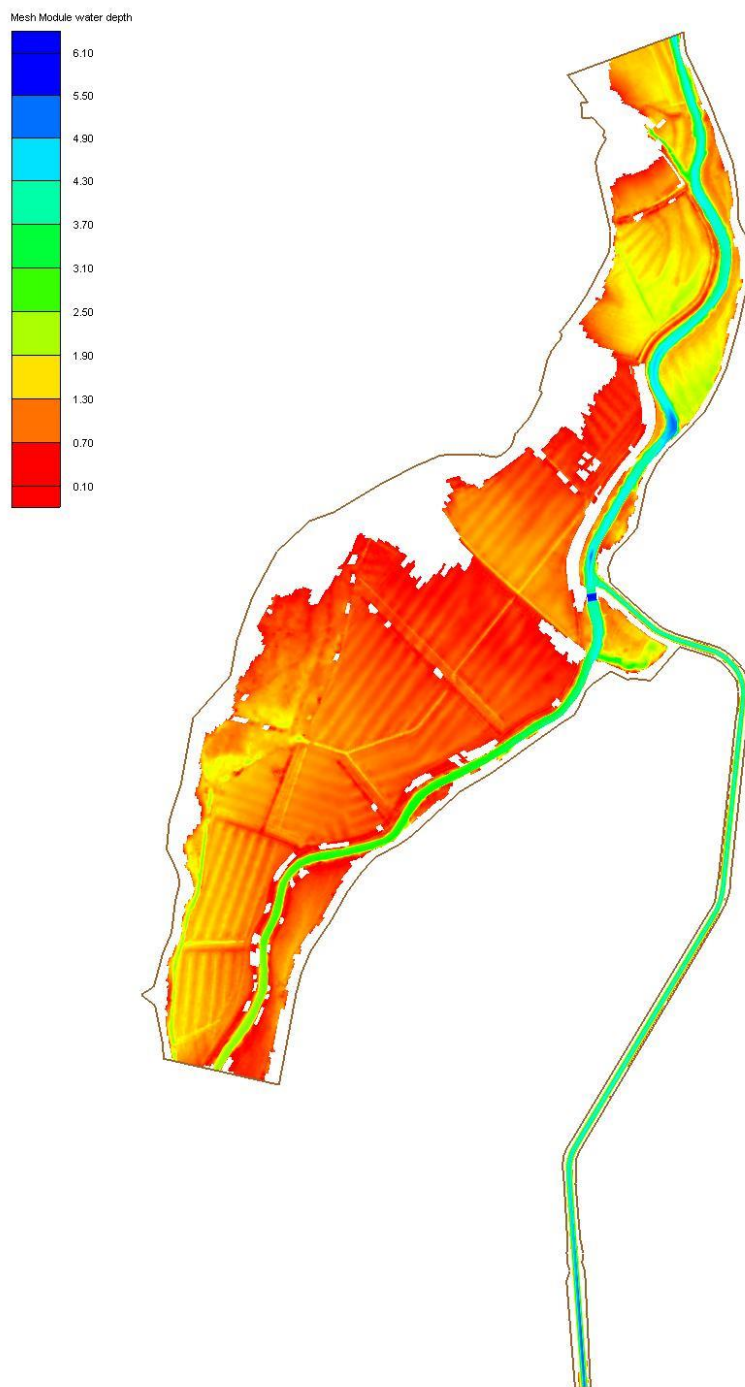
Příloha 5 - Mapa hloubek vody pro variantu se vztyčenou klapkou na kótu 282,95 m n. m. s kótou hladiny v nádrži neovlivňující proudění v přivaděči



Příloha 6 - Mapa svislicových rychlostí pro variantu se sklopenou klapkou



Příloha 7 - Mapa úrovní hladiny pro variantu se sklopenou klapkou



Příloha 8 - Mapa hloubek vody pro variantu se sklopenou klapkou

Příloha B – Fotodokumentace

1) Rozdělovací objekt

a) Jez ve Zličí



Obrázek 1.1 Pohled na jez ve Zličí proti proudu



Obrázek 1.2 Pohled na těleso jezu ve Zličí proti proudu



Obrázek 1.3 Detailní pohled na klapku

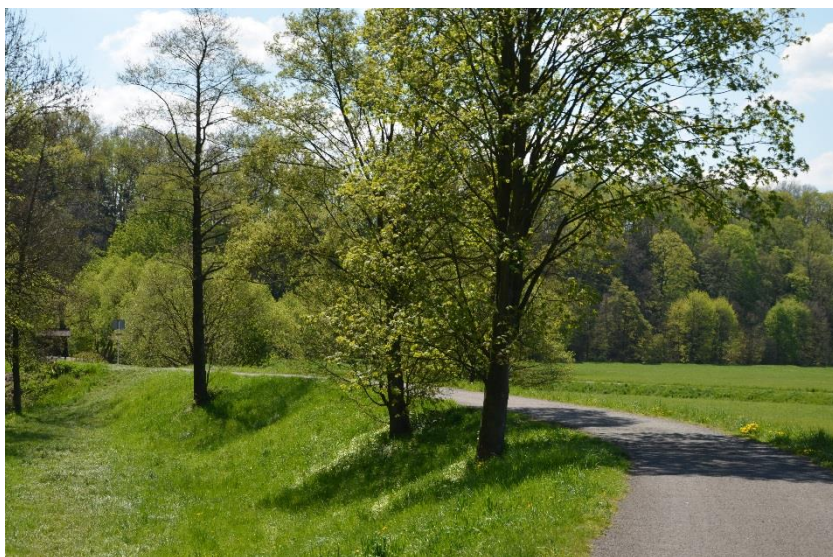


Obrázek 1.4 Pohled na strojovnu jezu (pravý jezový pilíř)



Obrázek 1.5 Limnigrafická stanice Zlič

b) Zemní hrázka



Obrázek 1.6 Pohled na těleso zemní hrázky



Obrázek 1.7 Korunu hrázky tvoří asfaltová cyklostezka

c) Nátok do přivaděče



Obrázek 1.8 Pohled z pravého pilíře jezu na nátok do přivaděče s lávkou



Obrázek 1.9 Nátok do přivaděče v nadjezí



Obrázek 1.10 Pohled na levý jezový pilíř

d) Pravostranný inundační přeliv



*Obrázek 1.11
Pravostranný inundační
přeliv*



*Obrázek 1.12 Povrch
přelivu je tvořen
udusaným štěrkem*



*Obrázek 1.13 Přeliv
přímo navazuje na těleso
zemní hrázky*



Obrázek 1.14 Patrné navýšení zemní hrázky při rekonstrukci v roce 2007

2) Úpský přivaděč



Obrázek 2.1 Vyústění přivaděče do vodní nádrže Rozkoš



Obrázek 2.2 Silniční most přes přivaděč



Obrázek 2.3 Střední část přivaděče



Obrázek 2.4 Přivaděč prochází obcí Zlič



Obrázek 2.5 Horní část přivaděče – na obrázku je patrná levobřežní betonová zídka vybudovaná při rekonstrukci v roce 2007

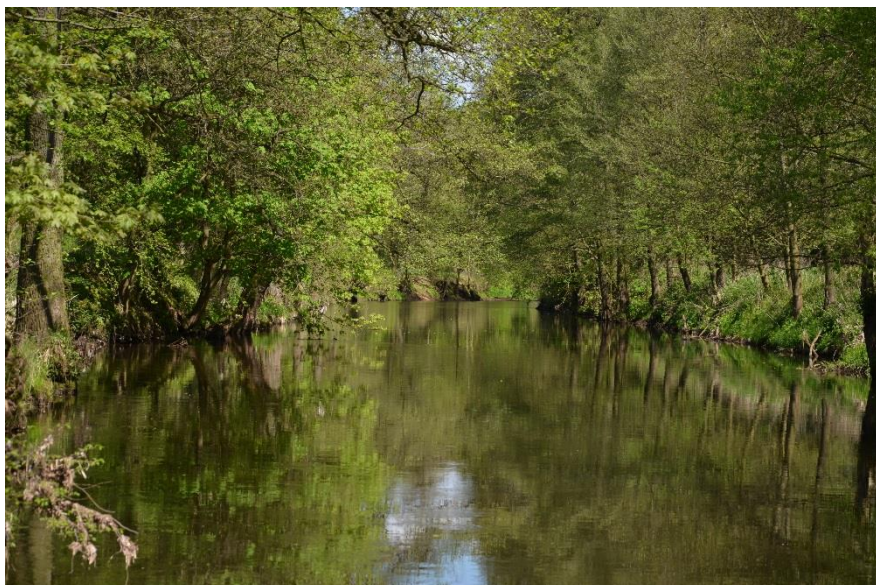


Obrázek 2.6 Potok Olešnice je veden šybkou pod přivaděčem

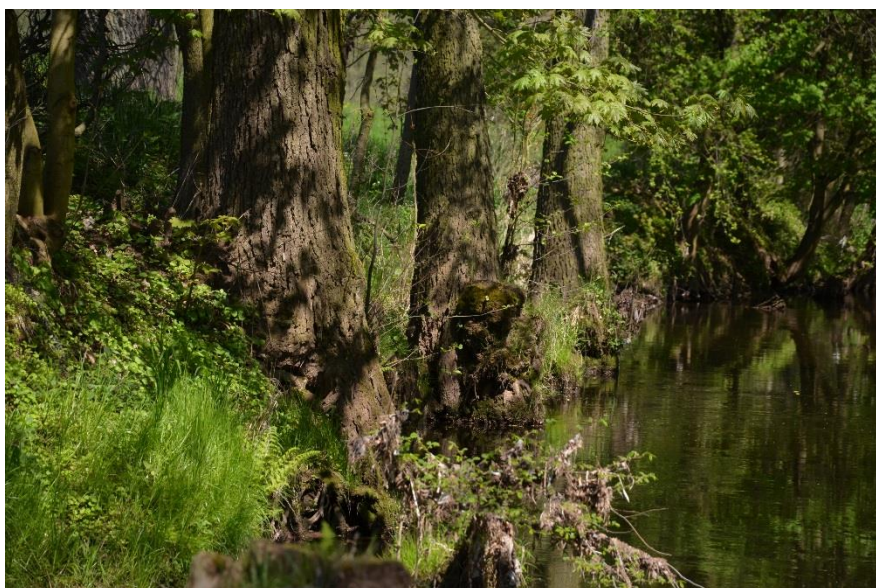
3) Úpa



Obrázek 3.1 Koryto řeky Úpy v horní části modelované oblasti (foceno březen 2016)



Obrázek 3.2 Koryto řeky Úpy v části 300 m nad jezem (foceno květen 2016)



Obrázek 3.2 Detail svahu koryta řeky Úpy (foceno květen 2016)



*Obrázek 3.3 Koryto řeky
Úpy v horní části
modelované oblasti
(foceno březem 2016)*



*Obrázek 3.4 Vilémův
most přes řeku Úpu,
160 m pod jezem (foceno
květen 2016)*



*Obrázek 3.5 Povrch
mostovky Vilémova
mostu tvoří asfaltová
komunikace (foceno
květen 2016)*



*Obrázek 3.6 Koryto
řeky Úpy v dolní části
modelované oblasti
(foceno březen 2016)*

4) Inundační území



*Obrázek 4.1 Pohled
na louku v horní části
modelované oblasti od
Ludrova mlýnu
(foceno březen 2016)*



*Obrázek 4.2 Ludruv
mlýn, pohled 1*



*Obrázek 4.3 Ludruv
mlýn, pohled 2*



*Obrázek 4.4
Kamenná zeď pod
Ludrovým mlýnem*



*Obrázek 4.5
Kamenná zed' pod
Ludrovým mlýnem*



*Obrázek 4.6 Louka
v pravostranné
inundaci nad
inundačním
přelivem*



*Obrázek 4.7
Ratibořický zámek*



*Obrázek 4.8
Asfaltová
komunikace přes
pravostrannou
inundaci vedoucí od
Vilémova mostu
k Ratibořickému
zámku*



*Obrázek 4.9 Lovecký
pavilon*



*Obrázek 4.10 Pohled
na louku v dolní
části modelované
oblasti (foceno
březen 2016)*

5) Povodně červen 2013 ($Q_{\max} = 133 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)



*Obrázek 5.1 Zatopený
Ludrův mlýn I*



*Obrázek 5.2 Pohled
na zatopenou louku
v horní části
modelované oblasti
od Ludrova mlýnu*



*Obrázek 5.3
Zatopený Ludruv
mlýn II*



*Obrázek 5.4
Kamenná zeď pod
Ludrovým mlýnem
(pro srovnání
s Obrázkem 4.5)*