

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



**Modelování povodňových průtoků a záplavových
čar na vodním toku Želivka**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Radek Roub, Ph.D.

Diplomant: Bc. Jiří Mudra, DiS.

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jiří Mudra, DiS.

Environmentální modelování

Název práce

Modelování povodňových průtoků a záplavových čar na vodním toku Želivka

Název anglicky

Modelling of flood event runoff and flood lines in Želivka river

Cíle práce

Cílem práce je provést zpřesnění problematiky modelování povodňových průtoků a záplavových čar na vodních tocích.

Simulace průchodu N-letých průtoků Q1, Q2, Q5, Q10, Q20, Q50, Q100 na zvoleném úseku vodního toku Želivka za využití program ArcGIS a HEC – RAS a vyhodnocení výsledků.

Metodika

1. Úvod
2. Cíle práce
3. Historie povodní v ČR
4. Povodně
5. Protipovodňová opatření
6. Modely pro simulaci povodní
7. Popis zvolené části vodního toku Želivka
8. Hydrotechnické posouzení zájmového území
9. Výsledky
10. Diskuze
11. Závěr
12. Použité zdroje
13. Přílohy

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran + grafické přílohy

Klíčová slova

HEC-RAS, GeoRAS, N-letost, povodeň, příčný profil, podélný profil, drsnost

Doporučené zdroje informací

Brunner, Gary N., 2010: HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Online:

ftp://ftp.usace.army.mil/pub/iwr-hec-web/software/ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf.

Roub R., Hejduk T., Novák P., 2012: Automating the creation of channel cross section data from aerial laser scanning and hydrological surveying for modeling flood events.

Warner J.C., Brunner G.W., Wolfe B.C., Piper S.S., 2010: HEC-RAS River Analysis System Application Guide.

Online: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.1_Applications_Guide.pdf.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů (Vodní zákon)

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Radek Roub, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 4. 4. 2016

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 4. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 12. 04. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Modelování povodňových průtoků a záplavových čar na vodním toku Želivka“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radka Rouba, Ph.D. a že jsem uvedl všechny použité literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal informace, a uvádím je v seznamu použitých zdrojů.

V Praze 9. dubna 2016

.....

Jiří Mudra

Poděkování

Rád bych poděkoval za odborné vedení vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radku Roubovi, Ph.D. za odborné vedení, poskytnuté informace a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Lud'ku Burešovi za konzultace týkající se softwaru HEC-RAS, paní Růženě Chaloupecké z ČÚZK za poskytnutí Digitálního modelu reliéfu 5. generace a v neposlední řadě panu Ing. Karlu Březinovi za poskytnuté podklady k vodnímu toku Želivka.

NÁZEV

Modelování povodňových průtoků a záplavových čar na vodním toku Želivka

ABSTRAKT

Problematika povodní a protipovodňové ochrany je v dnešní době velmi reflektovaným tématem, jemuž věnuje pozornost diplomová práce. První část se zabývá shromážděním a zpracováním relevantních informací, důraz je kladen na vypracování všech základních otázek týkajících se povodní a protipovodňové ochrany, důležitých pro jejich pochopení. Práce v další části poskytuje popis povodí Želivky zahrnující zájmové území ohraničené vzdušným vodní nádrže Švihov na 41,6182 ř. km a hrází vodní nádrže Sedlice na 63,8893 ř. km. Dále se věnuje modelování ustáleného proudění povodňových průtoků a modelování záplavových čar v zájmovém území. K simulaci jsou využívány softwary ArcGIS 10.2 s nadstavbou GeoRAS a HEC-RAS 4.1.0 a popis vytvoření modelu, k jehož sestavení jsou použity digitální model reliéfu 5. generace, příčné profily toku, podélný profil toku, drsnosti toku a inundace a geometrie objektů na toku. Výstupem práce jsou mapy rozlivu ve vybraných úsecích vodního toku, hlavně v místech se zástavbou.

KLÍČOVÁ SLOVA

HEC-RAS, GeoRAS, N-letost, povodeň, příčný profil, podélný profil, drsnost

TITLE

Modelling of flood event runoff and flood lines in Želivka river

ABSTRACT

Nowadays, the issue of floods and flood protection is very reflected theme which is dedicated to the thesis. The first part deals with the gathering and the processing of relevant information, the emphasis is on the development of basic questions about flooding and flood protection because of importance for understanding its. The next part of thesis provides a description of the catchment Želivka which involves the interest area which is bounded swells water reservoir Švihov at 41.6182 Km and dykes of water reservoirs Sedlice at 63.8893 Km. The next, the thesis also discusses the modeling of steady flow of flood flows and modeling flood lines in the area of interest. For the simulation are used ArcGIS 10.2 with overlaid of GeoRAS, HEC-RAS 4.1.0 and the description of creating a model for the assembly are used the digital elevation model fifth-generation, transverse profiles of stream, longitudinal profile of stream and roughness of stream and inundation and geometry of objects on the stream. The outcome of this work are maps of inundation in selected sections on the stream, in particular in areas with existing buildings.

KEYWORDS

HEC-RAS, GeoRAS, N-year flow, flood, transverse profile, longitudinal profile, roughness

Obsah

1	ÚVOD	10
2	CÍLE PRÁCE.....	12
3	HISTORIE POVODNÍ V ČR	13
3.1	Středověk.....	13
3.2	Povodeň 1862.....	13
3.3	Povodeň 1872.....	13
3.4	Povodeň 1997.....	14
3.5	Povodně 2002.....	14
3.6	Povodeň 2013.....	15
4	POVODNĚ	16
4.1	Povodí.....	17
4.2	Srážkoodtokový proces v povodí.....	17
4.3	Základní bilanční rovnice	18
4.4	Odtok	18
4.5	N-letý průtok	19
4.6	M-denní průtok.....	20
4.7	Povodňová vlna	20
4.8	Typy povodní	20
4.9	Záplavová území.....	22
4.10	Stupně povodňové aktivity.....	23
4.11	Povodňové plány.....	24
4.12	Povodňové orgány.....	24
5	PROTIPOVODŇOVÁ OPATŘENÍ	25
5.1	Technická opatření	26
5.1.1	Vodní nádrže	26
5.1.2	Poldr	27
5.1.3	Ochranné hráze a zdi.....	28

5.2	Přírodě blízká opatření	29
5.2.1	Revitalizace vodního toku	30
5.2.2	Les.....	31
5.2.3	Zemědělská činnost	32
6	MODELÝ PRO SIMULACI POVODNÍ	33
6.1	HEC-RAS.....	37
7	METODIKA	40
7.1	Povodí Želivka	40
7.1.1	Zájmové území	43
7.2	Tvorba modelu	52
7.2.1	Příprava vstupních dat v ArcGIS	52
7.2.2	Hydraulická analýza HEC-RAS	58
7.2.3	Modelování záplavových území GeoRAS	63
8	VÝSLEDKY	64
9	DISKUZE	67
10	ZÁVEŘ	70
11	LITERATURA A POUŽITÉ ZDROJE	72
12	SEZNAM VZORCŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ	77
13	PŘÍLOHY.....	79

1 ÚVOD

Voda je jednou z nejdůležitějších komodit potřebných k životu, ale zároveň je to jeden z živlů, který má dostatečně velkou sílu, aby člověka připravil o život nebo napáchal nemalé škody, nesnáze a útrapy. O velké síle byli přesvědčeni už lidé v dávné minulosti. Chování současné generace jako by nečerpalo a nenavazovalo na dosavadní zkušenosti a učilo vše od znova. Největším potenciálním nebezpečím v České republice jsou povodně. Naši předci si jejich existence byli vědomi, pozorovatelné to je na způsobu osidlování. Svá sídla stavěli mimo dosah zátopy způsobené povodní. Člověk dnešní doby se ve výstavbě nenechá vodou omezovat, spíše naopak svou výstavbou omezuje vodní toky. Buduje své domovy a další budovy v záplavových území a v těsných blízkostech břehů vodních toků a při následném zvýšení vodního stavu v řekách majícím za následek vytopení obydlí je plně zasažen důsledky nevhodné výstavby.

Téměř celé území České republiky bylo v historii nebo současnosti zasaženo povodněmi malého nebo velkého rozsahu. Některé lokality zažívají povodně opakovaně. S rozvojem vědních disciplín hydrologie, hydrauliky a hydroinformatiky lze některé povodně zastavit, ostatní alespoň ve velkém měřítku zmírnit, u dalších snížit jejich následky nebo je oddělit od člověka a jeho sídel. Omezení či zastavení povodně tkví v několika možnostech, které jsou většinou komplexní a navzájem na sebe navazují. Jsou jimi například vypracované manipulační řády, povodňové plány obcí, rozumné hospodaření s vodou, vybudovaná protipovodňová opatření, prevence a v neposlední řadě modelování povodňových průtoků.

Hydroinformatika získala rozvojem digitálních technologií velký význam při modelování povodňových průtoků a nenahraditelné místo v protipovodňové ochraně, a proto by na její další rozvoj měl být kladen velký důraz. Simulace povodňových průtoků je snad jediná metoda, kterou lze efektivně vizualizovat rozsahy záplav se zobrazením přímo ohrožených lokalit. Používání simulací povodní je velmi významné pro projektování protipovodňových opatření a jejich následné zanesení do ohrožené lokality a jejich ovlivnění povodňových průtoků.

Aby simulace povodňových průtoků byla věrohodná nebo vůbec proveditelná, je třeba dostatečně přesný a silný software a potřebné množství kvalitních dat. Jakmile jediná část procesu vypadne nebo nebude odpovídající kvality, výsledky, jestliže nějaké dostaneme, nejspíše nebudou odpovídat skutečnosti. Proto je nutné investovat nejen do prostředků na simulaci povodní, ale i do nástrojů na získávání

a zpracování vstupních dat. To se v České republice v dnešní době relativně daří. K dispozici jsou přesná geodetická zaměření příčných i podélných profilů vodních toků a přesná geodetická zaměření inundačních území podpořená leteckým skenováním terénu (digitální model reliéfu 5. generace), dostatek mapových podkladů (Ortofoto mapy, ZABAGE a další) a zaměření geometrie objektů.

I přes dobrou kvalitu datových podkladů a kvalitní výstupy simulací je třeba dbát na jejich přesnou prezentaci dosahovanou prostřednictvím vysoké odbornosti zpracovatelů. Musíme mít na paměti, že ovlivňovatelem kvality je převážně lidský faktor a jeho dosažená úroveň pochopení a znalostí dané problematiky. Komplexně funkční, ekonomicky a ekologicky přijatelné protipovodňové řešení není individuální záležitostí, ale je závislé na komunikaci a spolupráci několika lidí s různými dovednostmi a odbornostmi.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem první části diplomové práce bude formou rešerše sepsat a zpřehlednit problematiku týkající se povodní, jejich predikcí, protipovodňových opatření a řešení výjimečných situací při odstraňování povodňových škod. Tento popis bude sloužit k pochopení základní problematiky v oborech zabývajícími se povodněmi.

Druhá část práce si klade za cíl charakterizovat vybraný úsek na vodním toku Želivka a objekty, které se na něm nacházejí. Záměrem diplomové práce bude sestavit hydraulický model společně s namodelováním povodňových průtoků a záplavových čar včetně následného vytvoření grafických výstupů. Hydraulické modelování na vodním toku Želivka bude realizováno za pomoci softwaru HEC-RAS, ArcGIS a jeho nadstavby GeoRAS. Modelovány budou N-leté průtoky Q_1 , Q_2 , Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} . Bude sepsán podrobný popis postupu modelování povodňových průtoků na vodním toku Želivka. Pro potřebu modelování budou využívána data jednotlivých N-letých průtoků, digitální model reliéfu 5. generace, příčné profily, podélný profil, drsnosti koryta a inundace a objekty na vodním toku. Výstupy modelu budou zpracovány a zaneseny do mapových podkladů s částmi přímo ohroženými povodněmi.

3 HISTORIE POVODNÍ V ČR

Studium historických povodní je velmi důležitým faktorem pro pochopení a predikci povodňových situací a jejich prevenci. Velkou překážkou ovšem je nedostatečná dokumentace těchto výjimečných stavů. Historické povodně na našem území jsou nejlépe zdokumentované pro povodí Vltavy a to nejvíce v Praze. Povodí Vltavy po Prahu zabírá 34 % rozlohy České republiky, a tudíž ho můžeme považovat za reprezentativní povodí, které díky svému tvaru a orografii dobře reaguje na letní i zimní povodně (Daňhelka a kol. 2012).

3.1 Středověk

Ve středověku byly povodně častým jevem. Zdokumentování nacházíme pouze v kronikách. Povodně, ať už malých nebo velkých rozměrů, ovlivňovaly lidské životy stejně jako dnes. Každá povodeň ovšem přinesla určitý rozvoj a pokrok především v protipovodňové ochraně, například po povodni v roce 1272 byly poprvé stavěny na Vltavě v Praze jezy za účelem upravení sedimentačních vlastností toku. Povodně ve středověku byly i velkých rozměrů, například povodeň z roku 1432 je přirovnávána k povodni z roku 2002 (Brázdil a kol. 2005).

3.2 Povodeň 1862

Jednalo se o povodeň na přelomu ledna a února a postihla značnou část Střední Evropy. Příčinou povodně byly intenzivní srážky dopadající na vydatnou sněhovou pokrývku, což se odrazilo na stavech vodní hladiny na tocích, které dosahovaly kulminačních průtoků odpovídajících padesátiletým až stoletým průtokům (Daňhelka a kol. 2012).

3.3 Povodeň 1872

Povodeň, jenž proběhla v květnu roku 1872, patří mezi nejzajímavější hydrometeorologické jevy zdokumentované na našem území. Od této povodně nedošlo v České republice ke srovnatelné přívalové povodni (Brázdil a kol. 2005).

Hodnota kulminačního průtoků v Praze je odhadována na $3\,300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tento kulminační průtok odpovídá přibližně průtoku Q_{50} . Výjimečnost této povodně je především v tom, že se jednalo o odtok přibližně z 15 % povodí Vltavy nad Prahou. Část povodí Vltavy nad Berounkou se na povodních vůbec nepodílela (Brázdil a kol. 2005).

Před touto povodní již byl vytvořen plán pro varování obyvatel, ten však byl vytvořený jen pro větší města ležící na významnějších tocích, například Praha byla rozdělena do povodňových okresů a každý okres měl svého povodňového komisaře. Varování před povodní bylo prováděno signály z děl a v akutních případech strážníci budili obyvatele. Dalším krokem pro zefektivnění varování obyvatel před povodní bylo zasílání telegramů o změně stavu hladin ve vodních tocích z horních částí povodí (Brázdil a kol. 2005).

3.4 Povodeň 1997

Z hlediska rozsahu a škod byla povodeň roku 1997 nejtragičtější povodňová událost na našem území ve 20. století. Povodeň byla způsobena na začátku července mimořádně vydatnými srážkami a to na Moravě, ve Slezsku a ve východních Čechách. Výjimečné srážky vyvolaly na mnoha vodních tocích takové kulminační průtoky, které nebyly měřeny za celou dobu pozorování na daných řekách (Daňhelka a kol. 2012).

Povodně z roku 1997 zasáhly 1/3 území České republiky, způsobily smrt 60 lidí a postiženo bylo 536 obcí. Tato povodeň poukázala na celkovou nepřipravenost a neúplnost protipovodňových plánů, tyto nedostatky se ovšem po povodních začaly odstraňovat a byl vytvořen nový protipovodňový řád. Zdokonalily se meteorologické modely, radarový monitoring pohybu dešťových kapek, aplikace hydrologických predikčních modelů na vodohospodářsky významná povodí, legislativa, systematické vymezení a stanovení záplavových území. Povodně v červenci 1997 byly hlavním podmětem pro přezkoumání a přepracování N-letých průtoků (Daňhelka a kol. 2012).

3.5 Povodně 2002

Povodeň v roce 2002 byla způsobena nepříznivou meteorologickou situací na našem území. Na území České republiky spadlo velké množství srážek na mnoha místech zesílené orografií. V první vlně tento velký srážkový úhrn způsobil nasycení povodí a s tím související naplnění retenčních prostor vodních nádrží. Při druhé vlně nastala rychlá odtoková reakce prakticky v celém povodí Vltavy, která způsobila, že na řadě míst kulminační průtoky výrazně přesáhly odhadované hodnoty Q_{100} . Průtok Vltavy v Praze byl stanoven na $5\,160\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a doba opakování byla po přehodnocení určena na 200 až 500 let (Daňhelka a kol. 2012).

Povodeň z roku 2002, jako každá předchozí výjimečná situace, byla podmětem pro kroky vedoucí ke změnám a zdokonalení systému protipovodňové ochrany (Daňhelka a kol. 2012).

3.6 Povodeň 2013

Povodeň v roce 2013 proběhla ve třech hlavních fázích. První fáze povodně byla způsobena vytrvalými dešti především nad povodím Vltavy, jednalo se o největší fázi povodní 2013. Druhá fáze povodní přišla v důsledku lokálních intenzivních dešťů, které spadly na plně nasycená povodí v povodí Vltavy. Třetí, nejmírnější, fáze proběhla v oblasti Krkonoš, Jizerských hor a Českomoravské vrchoviny (Daňhelka a kol. 2014).

Především v první fázi povodní v roce 2013 dosáhly vodní toky průtoků až Q_{100} , zasaženo bylo 970 obcí. Kulminační průtok v Praze přišel 4. června v ranních hodinách, na limnigrafu v Malé Chuchli byl naměřen průtok $3\,210\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ při vodním stavu 545 cm, který odpovídá téměř třetímu stupni povodňové aktivity – extrémní povodně. Kulminační průtok by mohl být ovšem daleko větší, kdyby před samotnou povodní nebyla upuštěna Vltavská kaskáda, která zvýšila svůj retenční prostor dvojnásobně. Negativně se na kulminačním průtoku podílely neovladatelné přítoky vodního toku Vltava (Daňhelka a kol. 2014).

4 POVODNĚ

Pojmem povodně se rozumí dočasné výrazné zvýšení hladiny vodních toků nebo jiných povrchových vod, kde voda už zaplavuje území mimo koryto vodního toku a je riziko způsobení škod. Povodně mohou být zapříčiněny přírodními procesy jako je tání ledu, dešťové srážky nebo chod ledů, dále mohou být způsobeny poruchami vodních děl, které mohou vést k porušení a následnému protržení hradičí stavby, anebo řešením výjimečných situacích na vodním díle jako je například vypouštění vody z vodního díla z důvodu ochrany před přetečením a možným poškozením a protržením přehradního tělesa (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Pro popis povodní je jednou z nejdůležitějších charakteristik kulminační vodní stav, což je nejvyšší vrcholový vodní stav u průtokové vlny povodňové události. V hydrologii se dnes pracuje s další základní veličinou, kterou je kulminační průtok měřený v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Za pomoci kulminačního průtoku se může určit pořadí velikosti jednotlivých povodní. Z kulminačních průtoků jednotlivých vodoměrných profilů za určité období se statistickými metodami stanovuje N-letý kulminační průtok Q_N , který je dosažen nebo překročen průměrně jednou za N let (Státníková 2012).

Povodně mohou být zapříčiněny několika meteorologickými faktory. Tyto meteorologické faktory je možné rozdělit do dvou základních skupin a to do skupiny předběžných meteorologických procesů a do skupiny příčinných meteorologických procesů. Předběžné procesy působí několik dnů až měsíců před vznikem povodně a patří k nim nasycenost povodí, promrznutí půdy a výška sněhové pokrývky a její vodní hodnota. Příčinné procesy se vyskytují několik hodin až dnů před povodňovou událostí a představují spouštěč pro vznik povodně. Mezi příčinné faktory patří dešťové srážky, kladné teploty při tání sněhové pokrývky, rychlost větru ovlivňující průběh tání a další. Z hydrologických faktorů má nemalý význam míra naplnění koryta toku před povodňovou událostí (Blažek 2006).

Povodně v České republice představují největší přírodní riziko. Objevují se nepravidelně jak v čase, tak v prostoru s různým stupněm extremity, to znamená, že se vyskytují s různou dobou opakování a různou velikostí kulminačního průtoku. Povodeň lze chápat jako výjimečnou situaci, při které množství protékající vody vodním tokem z rozličných příčin překročí kapacitu protékajícího koryta. Překročení kapacity koryta toku se nejčastěji děje v důsledku srážkové činnosti, ale také snížením průtočnosti koryta chodem ledů, nakumulováním splavenin a podobně. Mezi největší škody způsobené povodní zpravidla patří podmáčení pozemků

a staveb, usazování kalů, erozní činnost proudění, znehodnocování pitných zdrojů a zejména ohrožení lidských životů a podobně (Blažek 2006).

4.1 Povodí

Povodí představuje základní pracovní hydrologickou jednotku. Je to území ohraničené rozvodnicí, ze kterého veškerá voda stéká a odtéká uzávěrovým profilem. Jedná se o sběrnou plochu toku, kde je realizován veškerý odtok a to odtok povrchový i podpovrchový. Povrchový odtok z povodí většinou převládá nad podzemním odtokem. Pro vymezení povodí se vyhledává oblast, z níž voda stéká z nejvyšších míst k níže položeným polohám. Rozvodnice je hranice povodí, uzavřená pomyslná linie probíhající po nejvyšších místech povodí vztažená k uzávěrovému profilu. Odděluje území, z něhož voda odtéká k sousedním vodním tokům. Úzávěrový profil je nejnižší místo v povodí, přes které odtéká veškerá voda z povodí (Jandora a kol. 2011, Hubačíková 2002).

Pro popis povodí se využívá těchto základních charakteristik:

- **Plocha povodí** je určena planimetrováním a je to plocha půdorysu povodí.
- **Délka toku** je vzdálenost od ústí toku k prameni toku měřená ve střednici toku. Ústí toku je považováno za začátek vodního toku. Měření vzdálenosti označujeme jako staničení.
- **Střední šířka povodí** je podíl plochy a délky od rozvodnice k danému uzávěrovému profilu.
- **Tvar povodí** reprezentuje, jak povodí vypadá v půdorysném průmětu. Přírozená povodí mají nejčastěji tvar symetrického nebo asymetrického listu, které nabývají podoby vějířovité nebo protáhlé.
- **Průměrná výška povodí** je reprezentativní výška povodí získaná vhodným zprůměrováním dostatečného množství jednotlivě naměřených nadmořských výšek na různých místech povodí.
- **Průměrný sklon povodí** je reprezentativní sklon povodí získaný z dostatečného množství sklonů povodí a jejich vhodným zprůměrováním (Hubačíková 2002).

4.2 Srážkoodtokový proces v povodí

Srážkoodtokový proces je postupná transformace srážek dopadajících na povodí až na odtok vody uzávěrovým profilem povodí. Jedná se o velmi složitý proces, který je ovlivněn řadou faktorů, především klimatických, do kterých spadá

časový a prostorový průběh spadlé srážky, vlhkost ovzduší, evapotranspirace, teplota ovzduší, rychlost a směr větru a podobně. Dalšími faktory ovlivňující srážkoodtokové procesy jsou geografické vlastnosti povodí, jako je plocha, velikost, střední nadmořská výška, tvar, reliéf, říční síť, hydrogeologické podmínky, vegetační pokryv a podobně. Tato specifika určují přenosné vlastnosti povodí, které jsou klíčové pro způsob, kterým se bude časový průběh srážky transformovat na časový průběh odtoku vody uzávěrovým profilem (Jandora a kol. 2011).

Samotný srážkoodtokový proces je započat dopadem srážek na povodí, od nichž jsou postupně odečteny hydrologické ztráty, které jsou zapříčiněny evapotranspirací, intercepcí, navlháním, infiltrací vody do půdy a povrchovou retencí. Po uplatnění veškerých ztrát od časového průběhu intenzity srážky získáme efektivní srážku. Efektivní srážka je množství vody spadlé na povrch povodí, které odtéká ve formě povrchového odtoku. Při odtoku efektivní srážky se uplatňuje další skupina ztrát a to hydraulické ztráty. Plošný povrchový odtok během svého odtékání do říční sítě proudí po povrchu a primárně se soustředí do ronových a erozních rýh. Po dotečení do říční sítě protéká uzávěrovým profilem, kterým však neodteče jen voda z povrchového odtoku, ale také část podzemní vody z nenasycené zóny nad hladinou podzemní vody a z nasycené zóny pod hladinou podzemní vody. Dále se na odtoku podílí hypodermický odtok, to je rychlý podpovrchový odtok (Jandora a kol. 2011).

4.3 Základní bilanční rovnice

Základní bilanční rovnice je vztah mezi úhrnem spadlých srážek vytvořeným v bezodtokové oblasti za určité časové období, udávaným ve výšce vodního sloupce v mm, výparem a velikostí odtoku v povodí (Vzorec 1).

$$H_o = H_s - H_v$$

Vzorec 1: Základní bilanční rovnice (Jandora a kol. 2011)

Jedná se o základní bilanční rovnici, tudíž platí pro povodí bez nádrží a pro povodí bez přítoků vody ze sousedních povodí (Jandora a kol. 2011).

4.4 Odtok

Odtok vody reprezentuje část srážek, které se dostávají do povrchových vod. Celkový odtok ze srážkové činnosti se dělí na:

- **Povrchový odtok**, který představuje tu část vody, která odtéká po povrchu terénu. Povrchový odtok můžeme dále rozdělit na odtok soustředěný a plošný. Soustředěný povrchový odtok probíhá v hydrologické síti. Plošný odtok probíhá neorganizovaně po celých plochách svahů ve formě ronů a po dosažení vodního toku se z něj stává odtok soustředěný.
- **Hypodermický odtok** je podpovrchový odtok, je to ta část celkového odtoku, která odtéká pod povrchem terénu, ale není v kontaktu s hladinou podzemních vod.
- **Podzemní odtok** je ta část celkového odtoku, která odtéká do podzemních vod a dále se účastní odtoku podzemních vod.

Podle času, za který se srážková voda dostane do vodních toků, se rozděluje odtok na přímý a základní. Přímý odtok je ta část odtoku, která se do vodních toků dostává už během trvání srážek a po jejich skončení. Za přímý odtok můžeme považovat hypodermický odtok a povrchový odtok. Přímý odtok je hlavní příčinou vzniku povodňových událostí a vodní eroze půdy. Základní odtok je část srážek, která odtéká do podzemních vod a do povrchových vod se dostává až po určitém čase po skončení srážek, vodní toky zásobuje i v bezesrážkových obdobích (Hubačíková 2002).

4.5 N-letý průtok

N-letý průtok je průtok, který je dosažen nebo překročen v dlouhodobém průměru průměrně jednou za N let. Díky této definici si nelze představovat, že daný N-letý průtok se pravidelně vyskytuje jednou za N let, není to průtok, pro jehož výskyt je potřeba, aby uplynulo N let, než se opět dostaví. To například znamená, že průtok roven 100letému opakování bude pravděpodobně překročen za 1000 let desetkrát, čili v průměru jedenkrát za 100 let, ale může se stát, že se v některých 100 letech nevyskytne případ dosažení nebo překročení ani jednou a v jiných 100 letech se může vyskytnout vícekrát než jednou (Kemel a kol. 1994).

N-leté průtoky jsou základními stavebními kameny pro návrhovou vodohospodářskou činnost. Nejběžněji používanými N-letými průtoky jsou průtoky s dobou opakování 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 a více let. Každý z odvozených N-letých průtoků má smysl, jelikož projektování rozličných vodohospodářských staveb vyžaduje různé návrhové průtoky. U říčních niv není potřeba vodohospodářské stavby dimenzovat na velké doby opakování na rozdíl od vodohospodářských staveb

umístěných v městských zástavbách nebo u přehrad (Kemel a kol. 1994, ČSN 75 0110).

4.6 M-denní průtok

M-denní průtok je průtok, který je dosažen nebo překročen za m dní v jednom roce. M-denní průtok patří mezi základní hydrologické údaje a určuje se z funkce překročení průměrných denních průtoků. Jako nejběžněji používané doby opakování a překročení se používá 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 355 a 364 dnů v roce. M-denní průtoky jsou potřebné při vyhodnocování nakládání s povrchovými a odpadními vodami (Kemel a kol. 1994, ČSN 75 1400).

4.7 Povodňová vlna

Pro řešení nemála vodohospodářských úkolů je zapotřebí zkonstruovat povodňovou vlnu s kulminačním průtokem a odpovídajícím objemem. Povodňová vlna představuje přechodné zvýšení a následný pokles průtoků vyvolaný srážkovou činností, táním sněhu a podobně. Povodňová vlna se skládá ze vzestupné větve, která udává dobu stoupání vodního stavu a průtoku od začátku vzduť až po dosažení kulminačního průtoku, který reprezentuje maximální průtok povodňové události. Po dosažení kulminačního průtoku přichází poklesová (sestupná) větev, která je charakteristická dobou poklesu vodního stavu a průtoku až do konce povodňové vlny. Jednotlivé povodňové vlny se mohou kumulovat a nasčítávat například na soutoku dvou toků, anebo mohou za sebou přicházet v rychlém sledu, kdy sestupná větev nedospěje ke konci povodňové vlny a už ji vystřídá další vzestupná větev a následný kulminační průtok (Kemel 1996).

Ze zákonitostí povodňových vln vyplývá, že u horských povodňových toků je povodňová vlna úzká, doba vzestupu je strmá a jen o málo kratší než doba poklesu. Naopak u vodních toků ležících v nižších polohách je povodňová vlna se širokou základnou a vzestupná větev je daleko kratší v porovnání se sestupnou větví, která má značně delší trvání (Kemel 1996).

4.8 Typy povodní

Povodňové situace jsou charakteristické především povodňovou vlnou.

Povodňovou vlnu na začátku tvoří počáteční průtok (pata vlny) přecházející v následnou vzestupnou větev, která stoupá až k dosažení kulminačního průtoku

(vrcholu). Poté následuje sestupná větev, u které je doba trvání většinou delší než u vzestupné větve (Blažek 2006).

Povodně lze rozdělit do několika základních kategorií:

- **Povodně z přívalových srážek** jsou zapříčiněny krátkodobými přívalovými srážkami o vysoké intenzitě a jejich hlavními charakteristikami jsou nahodilost a s tím spojená extrémní pravděpodobnostního výskytu na jakémkoliv území (Vodní hospodářství 2012, 62(9)). Půda není schopna vstřebávat rychlou dotaci srážkové vody, tudíž voda rychle odtéká po povrchu. Přívalové povodně se pohybují velmi rychle, mají velkou ničivou sílu a způsobují nemalé škody (ČHMU 6. 10. 2015).
- **Bleskové povodně** bývají způsobeny přívalovými dešti trvajících jen několik hodin. Bleskové povodně jsou charakteristické rychlým vzestupem hladin během velmi krátkého časového úseku. Na povodích o větší rozloze se bleskové povodně zpravidla nijak výrazně neprojeví díky velké retenční schopnosti, ovšem na malých povodích dojde k rychlému nasycení povodí, jehož důsledkem je blesková povodeň (Blažek 2006).
- **Letní povodně** vznikají při několikadenních intenzivních letních srážkách. Bývají často velmi zesílené orografií. Tento typ povodní rychle nasatí povodí a to není dále schopno akumulovat vodu a ta tudíž odtéká povrchovým odtokem (ČHMU 6. 10. 2015).
- **Povodně z tání sněhové pokrývky** jsou způsobené táním sněhu v zimních a jarních měsících. Nebezpečí jejich vzniku spočívá především ve vysoké sněhové pokrývce (převážně v nižších a středních polohách), v absenci dílčího tání v průběhu zimy, promrzlé půdě pod sněhovou pokrývkou, rychlém oteplení s teplotou vzduchu nad bodem mrazu i v nočních hodinách a ve výskytu dešťových srážek v průběhu oblevy (ČHMU 6. 10. 2015).
- **Ledové povodně** jsou výsledkem zamrznání řek a s tím spojeným zmenšováním průtočného profilu koryta toku a následným vyběžením. Dalším rizikem spojeným s výskytem ledových povodní jsou ledové kry unášené během oblevy po toku a jejich následné zaseknutí a nakumulování, které má za následek vzduť hladiny a zatopení přilehlého okolí. Nejrizikovějšími místy pro zaseknutí unášených ker na vodních tocích jsou mělčiny, jezy, mosty a další (ČHMU 6. 10. 2015).
- **Zvláštní povodně** jsou veškeré povodně nezpůsobené přírodními procesy. Mezi zvláštní povodně můžeme zařadit povodně vzniklé havárií

vodních děl, jako je protržení hrází a následně zatopení prostoru pod hrází akumulovanou vodou z vodního díla. Další příčinou vzniku zvláštní povodně může být nutnost rychlého snížení vodního stavu ve vodní nádrži způsobující zvýšení hladiny vodního toku pod nádrží a jeho vyběžení spojené s rozlitím do okolního prostoru (ČHMU 6. 10. 2015).

4.9 Záplavová území

Pojmem záplavové území je chápáno administrativně určené území, které může být při výskytu přirozené povodně potenciálně zaplaveno vodou. Stanovují se na základě rozhodnutí daného vodohospodářského úřadu a na jeho základě je zaneseno do územního plánu (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Přirozená záplavová území je možné rozdělit do dvou základních kategorií, kterými jsou část současně zastavěná (souvisle nebo s prolukami) a nezastavěná část (volné přirozené inundační území). Další dělení přirozených záplavových území vychází z pravděpodobnosti výskytu povodně a nebezpečnosti povodňového průtoku na aktivní průtočnou zónu, pasivní průtočnou zónu a historickou průtočnou zónu (Konvička a kol. 2002).

Aktivní průtočná zóna přirozeného záplavového území je část území, do kterého se při povodních soustřeďuje rozhodující část celkového povodňového průtoku. Zde se nesmí umisťovat, povolovat a provádět stavby s výjimkou vodních děl, kterými se upravuje vodní tok, převádějí povodňové průtoky, provádějí úkony v rámci opatření před povodněmi a podobně, a dalších vodohospodářských staveb. V aktivních záplavových územích je dále zakázáno provádět veškeré aktivity zhoršující odtok povrchových vod (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Pasivní průtočná zóna přirozeného záplavového území je oblast, která je zatopena při průchodu povodně. Voda, která jí prochází, protéká nízkou rychlostí, mnohdy mezi rozličnými překážkami. Podíl povodňového průtoku je zanedbatelný a k takto vymezené zóně je přístupováno jako k zóně obecné regulace. V pasivní zóně je povoleno rekonstruovat a modernizovat stávající stavby, umisťovat nové stavby v rámci současné zástavby bytové výstavby, budovat místní občanskou vybavenost a s tím spojenou infrastrukturu, jestliže vodní stav při návrhové povodni nepřesáhne v místě stavby 0,5 metru. Je však zakázáno do ní umisťovat školy, lůžkové zdravotní a sociální zařízení, veřejné ubytovací zařízení, budovat a umisťovat objekty průmyslové a zemědělské výroby, sklady škodlivých látek, čerpací stanice pohonných hmot a jiná zařízení, která by měla neblahý vliv na jakost vody při jejich

zaplavení návrhovou povodní. Nově budované stavby a rekonstrukce a modernizace staveb v pasivní zóně je nutné provést tak, aby splňovaly požadavky na zamezení vniknutí vody do objektu (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Vedle aktivních a pasivních záplavových průtočných zón jsou evidovány historické průtočné zóny přirozeného záplavového území, do nich náleží historická záplavová území, pokud se v nich nevyskytují aktivní průtočné zóny. Přístupuje se k nim jako k zóně opatrnosti. Do historických zón je možné umisťovat nové budovy bytového fondu, obecní vybavenost a infrastruktury s podmínkou technického zabezpečení proti vniku vody. Nedoporučuje se výstavba škol, lůžkových zdravotních a sociálních zařízení a veřejných ubytovacích zařízení. V historických záplavových zónách je zakázáno budovat objekty s možností zhoršení jakosti vody při možném zatopení (Konvička a kol. 2002).

4.10 Stupně povodňové aktivity

Stupněm povodňové aktivity se rozumí míra ohrožení povodňovou událostí. Odvíjí se od vodního stavu nebo průtoku v hlásném profilu na vodních tocích nebo dle kritické hodnoty jiného jevu určujícího příslušný povodňový plán (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Míra opatření pro ochranu před konkrétní povodňovou událostí se řídí potenciálním nebezpečím nebo vývojem povodňové situace. Tato míra nebezpečí se vyjadřuje třemi stupni povodňové aktivity (SPA):

- **1. SPA – stav bdělosti** nastává v případě nebezpečí přirozené povodně vydáním výstražného stavu předpovědní povodňovou službou nebo tehdy, když je vyžadováno věnovat vyšší pozornost vodnímu toku. Stav bdělosti je zahajován hláskou a hlídkovou službou a zaniká po pominutí příčin nebezpečí. Na vodních dílech nastává tento stav po dosažení limitních hodnot některého z pozorovaných jevů, které by mohly ohrozit bezpečnost vodního díla.
- **2. SPA – stav pohotovosti** nastává, když nebezpečí přirozené povodně přechází v povodeň, ale nedochází k výraznějšímu rozlivu a škodám mimo koryto. Při 2. SPA se uvádějí do pohotovosti prostředky zabezpečovacích prací, provádějí se opatření ke zmírnění průběhu povodňové situace dle povodňového plánu.
- **3. SPA – stav ohrožení** nastává, jestliže hrozí bezprostřední nebezpečí nebo je riziko vzniku větších škod, ohrožení majetku v záplavové zóně či

jiný potenciální druh ohrožení. Při 3. SPA se provádějí povodňové zabezpečovací práce dle povodňového plánu a dle potřeby záchranné práce a evakuace obyvatel (Zákon č. 254/2001 Sb.).

4.11 Povodňové plány

Povodňové plány jsou dokumenty, které obsahují způsob zajištění spolehlivých informací v dostatečném časovém předstihu před povodňovou událostí, možnosti ovlivnění odtokového režimu, organizaci a přípravu zabezpečovacích prací, obsahují způsob zajištění aktivizace povodňového orgánu, zabezpečují hlásné a hlídkové služby, ochranu objektů, přípravu a organizaci záchranných prací, zajišťují obnovení povodní znemožněné základní funkcí v objektech a v území a stanovují směrodatné limity stupňové aktivity (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Obsah povodňového plánu se dělí na věcnou část, kde jsou uvedeny údaje nezbytné pro zvládnutí ochrany před povodněmi a směrodatné limity pro vyhlášení stupňů povodňové aktivity. Dále na organizační část, která obsahuje jmenné seznamy, adresy a spojení na účastníky ochrany před povodněmi, úkoly pro jednotlivé účastníky. V neposlední řadě na grafickou část, ve které se nachází mapy a plány se zakreslením hlavních záplavových území, evakuační trasy, místa soustředění, hlásné profily a informační místa (Zákon č. 254/2001 Sb.).

4.12 Povodňové orgány

Řízení ochrany před povodněmi mají na starost povodňové orgány a do tohoto řízení spadá příprava před povodněmi, řízení, organizace a kontrola všech příslušných činností v průběhu povodně a v období bezprostředně po povodni. Do povodňových orgánů patří orgány obcí a v Praze orgány městských částí, obecní úřady s rozšířenou působností, krajské úřady a Ministerstvo životního prostředí. Ministerstvo vnitra zabezpečuje záchranné práce. Povodňové orgány mohou během povodňové události konat opatření a vydávat operativní příkazy k zabezpečení ochrany před povodněmi, v odůvodněných případech i nad vytyčený rámec povodňových plánů, ale v případě takového jednání musí uvědomit dotčené osoby. Mimořádné pravomoci povodňovým úřadům vznikají při vyhlášení druhého nebo třetího stupně povodňové aktivity a končí odvoláním těchto stupňů (Zákon č. 254/2001 Sb.).

5 PROTIPOVODŇOVÁ OPATŘENÍ

Po dlouhou dobu počátečních fází rozvoje civilizace platilo pravidlo upravující vztahy lidí a povodní „lidé od vody“. Jestliže velká voda zasáhla obyvatele usídlené kolem vody, většinou se stěhovali z jejího dosahu nebo do výše položených míst. V dřívějších dobách bylo v případě potřeby vzdálení se od vody k dispozici dostatek volného místa, to však s postupem času a s rozmachem hospodářství a houstnoucí zástavbou přestal být tento přístup realizovatelný. Společně s budováním zástavby i v záplavových zónách bylo potřeba tyto nově vystavěné objekty chránit před nepříznivými účinky vody (Bartoška a kol. 2009).

Cílem protipovodňového opatření je zajištění bezpečného odvedení vody z povodí, transformace povodňové vlny a minimalizace škod při povodňové události. Snaha o ochranu lokalit ležících blízko vodních toků a zdrojů je velmi důležitá, avšak vždy musí být opodstatněna. Protipovodňová opatření mají smysl v případě ochrany intravilánů měst a obcí, ale nemají smysl v extravilánu a to především u lokalit s trvalým travním porostem. Právě naopak se lokality zatravněné a méně významné zemědělské pozemky dají využít, jako vhodné recipienty při průchodu povodňové události a tím výrazně přispívají k transformaci povodňové vlny a podílejí se na ochraně lokalit ležících pod nimi. Při budování protipovodňového opatření je důležité dbát na návrhové hodnoty kulminačního průtoku, jejich ekonomičnost a v neposlední řadě ekologickou stabilitu v krajině (Tabulka 1), (Šedivý a kol. 2011).

Tabulka 1: Hodnoty průtoků (Šedivý a kol. 2011)

Lokalita	Návrhový průtok Q_n ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Centra měst	$\geq Q_{100}$
Souvislá zástavba	Q_{100}
Rozptýlená zástavba	Q_{50} až Q_{100}
Sady, chmelnice	Q_{10}
Orná půda	Q_5
Louky, lesy	Q_{30d} až Q_1

Protipovodňová opatření můžeme rozdělit do dvou základních skupin a to na opatření přírodě blízká a technická, ovšem z poznatků získaných nejen v České republice ale i v zahraničí můžeme usoudit, že nejefektivnější jsou protipovodňová opatření, která kombinují jak technické tak „přírodní“ prvky ochrany (MŽP 2000, cit. 7. 10. 2015).

Protipovodňová opatření v povodí, která snižují odtok, je třeba udržovat v dobrém stavu, jelikož v případě nevyhovujícího stavu mohou zapříčinit větší škody,

než ke kterým by došlo před jejich vybudování. Při návrhu a realizaci protipovodňových opatření se musí vzít v potaz jednotlivé charakteristiky povodí a lokalit, na nichž má být protipovodňové opatření vybudováno. Jsou jimi topografické, geologické, hydrogeologické, hydropedologické a další vlastnosti. Díky nim je každá lokalita jedinečná a tudíž nelze bez předchozí analýzy přenášet protipovodňová opatření z povodí na povodí a z lokality na lokalitu (Máca 2008).

Při volbě protipovodňového opatření musí být vzata v potaz návrhová povodeň. Zpravidla je návrhová povodeň určena jako průtok se zvolenou N-letostí, kde N představuje dobu opakování kulminačního průtoku udávanou v letech. Je nutno si pamatovat, že návrhová povodeň je průtok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, který je dosažen nebo překročen v průměru alespoň jednou za N let (Říha 2010).

Pro řešení protipovodňové ochrany v městské zástavbě je nejdůležitější stanovení záplavových území.

5.1 Technická opatření

Účelem technických protipovodňových opatření je především zmírnit účinky povodňové události zachycením části jejího objemu a tím snížení kulminačního průtoku nebo znemožnění rozlivů technickými prostředky, kterými jsou vodní nádrže, poldry, ochranné hráze a zdi a podobně (Vládní usnesení č. 382 2000).

Veškerá protipovodňová opatření technického rázu jsou schopna fungovat do stupně povodňové události, na kterou jsou dimenzována a konstruována, ale tento stupeň povodňové události může být kdykoli překročen, proto se technická protipovodňová opatření navrhují tak, aby jejich konstrukční prvky byly součástí mnohoúčelového systému vodního hospodářství (MŽP 2004, cit. 21. 10. 2015).

5.1.1 Vodní nádrže

Vodní nádrže představují významná protipovodňová opatření. Při průtoku povodňové vlny mají schopnost dočasného zadržení určitého objemu vody, v jehož důsledku můžeme v toku pod nádrží pozorovat jinou povodňovou vlnu, než která přitekla do nádrže. Povodňová vlna, která přejde přes vodní nádrž, bude delší s nižším kulminačním průtokem. Tato transformační schopnost vodních nádrží je závislá na několika faktorech. K hlavním faktorům ovlivňujících povodňové vlny patří velikost kulminace přitékající do vodní nádrže, úroveň hladiny ve vodní nádrži před přitečením povodňové vlny, kapacita a manipulace vypouštěcího zařízení, velikost retenčního prostoru a podobně (Kemel 1994).

K ovlivnění povodňových průtoků na vodních nádržích slouží ovladatelný a retenční (neovladatelný) prostor. Pro návrh vodní nádrže je nezbytná znalost maximálního povodňového průtoku. Velikost ochranného prostoru nádrže se stanoví simulací řízení nádrže při průchodu povodňové vlny, planimetrováním velikosti ochranného prostoru z grafického návrhu vodní nádrže, grafickým řešením součtových čar přítoku a odtoku a z objemové čáry povodně, která umožňuje stanovit závislost mezi objemem ochranného prostoru a odtokem (Kovář a kol. 2009).

Povodňový průtok ve vodní nádrži je možné ovlivnit manipulací výpustními zařízeními. Neovladatelný retenční prostor ovlivňuje snížení povodňové vlny v závislosti na jeho objemu a parametrech bezpečnostního přelivu (Sborník 1998).

5.1.2 Poldr

Pojmem poldr se rozumí suchá ochranná nádrž, která má za úkol zadržet velké množství vody a tím chránit níže položená území před povodněmi. Především se budují v horních částech povodí. Pro zajištění nejvyšší účinnosti poldru je nutné, aby jeho akumulační prostor byl velký tak, aby byl schopen zachytit objem vody odtékající při povodňové události s průměrnou dobou opakování nejméně 50 let. Poldry se naplňují při průchodu povodně, jinak je jejich dno porostlé travou a slouží jako louka (Kovář a kol. 2009).

Poldry mohou být navrhované jako samostatné nádrže nebo v kaskádě na svahu (svahové nádrže) nebo při vodním toku jako boční nádrže. Jsou velmi efektivní při potřebě zvýšené retence vody v povodí a z hlediska protierozní ochrany (Sborník 1999).

Poldry se dají chápat jako jistá náhrada za vytlačení přirozeného inundačního území. Na rozdíl od údolních nádrží je jejich celý vnitřní objem určen k retenci vody během povodňové události. Plnění poldrů během povodně může být řízeno funkčními přiváděcími a výpustními objekty. Po naplnění poldru a skončení povodňové události jsou vypouštěny výpustními zařízeními nebo se nechají přirozeně zasakovat, případně je možné zadržanou vodu využít pro rozličné potřeby. Nevýhodou poldrů je jejich specifická jednoúčelovost a nutnost udržovat jejich výpustné a přiváděcí zařízení stále provozuschopné i během bezpovodňového období. Další nevýhodou je nemožnost využívat a udržovat plochy poldrů během jednotlivých povodňových událostí. Tyto vytčené nedostatky jsou ovšem v některých případech převáženy výhodami poldrů, především se jedná o snížení průtoku a hladiny pod poldrem během povodně, časové oddálení kulminačního průtoku a jeho snížení. Díky těmto výhodám představují poldry významné protipovodňové opatření (Čamrová a kol. 2006).

5.1.3 Ochranné hráze a zdi

Účelem ochranných hrází a zdí na vodním toku je soustředit vysoký průtok do mezihrázního prostoru a tím zabránit zaplavení intenzivně využívaných prostorů v záhrázích až do návrhového průtoku. Výstavba ochranných hrází a zdí je opodstatněna v případech, kdy není možno vytvořit koryto toku s takovou kapacitou, která by odpovídala návrhového průtoku z technických, ekonomických nebo ekologických důvodů. Mohou se budovat po obou stranách vodního toku nebo jen na jedné straně. Jsou-li budovány po obou stranách toku, nemusí být stejně vysoké (Říha 2010).

Ochranné hráze a zdi na vodních tocích patří k nejstarším vodohospodářským stavbám (Říha 2010).

Protipovodňové opatření v podobě ochranných zdí je zpravidla realizováno ze dvou částí. První část zdi je vybudována pod povrchem s těsněním. Tyto stavby jsou reprezentovány například štětovicovými stěnami, sloupy tryskové injektáže, podzemními stěnami se základovými pasy a podobně. Štětovicové stěny jsou budovávány při hloubce spodní stavby minimálně 2 metry, podzemní betonové stěny s hloubkou kolem 1 metru, sloupy tryskové injektáže bývají používány v místech křížování se sítěmi infrastruktury. Druhá část zdi je nadzemní a může být budována jako pevná nebo jako mobilní, případně lze vybudovat jejich kombinaci. Pevné části zdí se většinou budují z betonu nebo jsou zděné. Mobilní části protipovodňového opatření se budují převážně z hliníkových hradítek a ze slupic (Vodní hospodářství 62(6)).

Ochranné hráze jsou realizovány jako sypaná a hutněná zemní tělesa převážně o lichoběžníkovém příčném profilu a jejich výstavba a správa je totožná s hrázemi malých vodních nádrží. Při výstavbě se nejčastěji používá materiál ze soudržných zemin od homogenních hrází až po hráze s nehomogenním těsnícím jádrem doplněných nesoudržnými zeminami a kamenivem na stabilizační části, drény a filtry (Říha 2010).

Provedení protipovodňového opatření v podobě ochranných zdí a hrází může být rozličné formy. Lze je budovat jako liniové stavby podél vodních toků procházející zástavbou nebo mohou být vystavěny jako kruhová ochrana okolo objektů nebo celých obcí, která by zajišťovala protipovodňovou ochranu ze všech stran. Návrhy a realizace hrázových systémů by měly respektovat určité zásady. Základní zásada spočívá v komplexnosti. Hrázová ochrana musí být zkoordinována s ostatními prvky protipovodňové ochrany. Hráze je třeba situovat co možná nejdále od vodního toku.

Konstrukce hrází musí zajišťovat stabilitu svahů, pro zajištění stability je doporučovaný sklon svahů alespoň 1:2 až 1:25. Zároveň musí umožňovat monitoring a údržbu hráze, proto se doporučuje, aby byla koruna hráze široká alespoň 2,5 až 4 m. Další zásady, které by se při realizaci ochranných zdí a hrází měly dodržovat, spočívají v nutnosti odvodnění prostoru za hrází a v možnosti kontroly chování hráze při povodni, například sledováním průsaků hrází a podobně (Konvička kol. 2002).

Další možností protipovodňové ochrany měst a obcí jsou mobilní prvky, mezi které patří přenosné rozebíratelné zdi, vakové individuální ochrany a pytlování. Pro zajištění efektivity mobilních protipovodňových prvků je potřebná včasná prognóza povodně a řádná údržba a skladování zařízení v době běžných průtoků. Prvky mobilní protipovodňové ochrany lze na základě charakteru použití rozdělit na konstrukční řešení navržená jako součást systematického protipovodňového opatření a na prvky používané pro zvýšení ochrany území při povodňové situaci, jejichž použití má spíše charakter havarijní ochrany. Mobilní prvky protipovodňové ochrany můžeme dělit také podle konstrukce. Mobilními prvky nacházejícími se zpravidla na velkých povodích, kde je možno povodňovou událost předpovědět řádově v hodinách dopředu, jsou převážně montované zdi na předem připravených patkách s těsněním a podpěrami. Další konstrukční typ reprezentuje pytlování, které je podmíněno dostatkem místa pro umístění pytlů, dostatkem pytlů, písku a pracovní síly. Vakové hradící konstrukce, které jsou vhodné pro ochranu menších území při nedostatku sil a v místech, kde je možnost se připojit na elektrický proud nebo na tlakový rozvod vzduchu pro naplnění a natlakování vaku, představují další konstrukční prvek mobilní protipovodňové ochrany (Konvička kol. 2002).

Budování ochranných zdí a hrází je ovšem v dnešní době značně limitováno nároky na zábor pozemků. Rizikem při budování ochranných zdí a hrází mohou být problémy se založením zemních objektů, průsaky, odvodnění území za hrází, jejich údržba a monitoring (Konvička kol. 2002).

5.2 Přírodě blízká opatření

Základním typem přírodě blízkým protipovodňovým opatřením je komplexní revitalizace koryta vodního toku a obnovení hydrologických funkcí říční nivy, zpomalení proudění a postupné uvolňování zadržené vody z povodňové události (Možnosti řešení povodňových opatření v Česko-slovenském příhraničí 14. 10. 2015).

5.2.1 Revitalizace vodního toku

Základem při revitalizaci vodních toků z pohledu protipovodňové ochrany je návrh vhodné trasy a příčného profilu koryta toku. Prodloužení trasy vodního toku má velký vliv na snížení průtočné rychlosti pro daný průtok a na snížení podélného sklonu. Ještě více významným faktorem pro ovlivnění a bezpečné převedení kulminačních průtoků u návrhu revitalizace je příčný profil koryta. Koryto vodního toku musí být navrženo tak, aby bezpečně převedlo návrhový průtok kulminace (Šedivý a kol. 2011, Tlapák a kol. 2001).

Prodloužení doby odtoku a snížení kulminačního průtoku má pozitivní vliv na snížení průtokových charakteristik v nižších částech vodního toku a povodí. Rychlost proudění ve vodním toku přímo závisí na sklonu dna, konkrétně na druhé odmocnině sklonu dna, která vyjadřuje, že při dvojnásobném prodloužením trasy toku se sníží podélný sklon na polovinu a průtočná rychlost na 70 % rychlosti dosahované při narovnání koryta vodního toku. Prodlužování koryta vodního toku v nezastavěných území nepředstavuje větší problém, ale v územích se zástavbou dochází při těchto snahách k mnoha komplikacím a tudíž je mnohdy prodlužování trasy toku v intravilánu nemožné. U návrhu příčného profilu koryta je nutno dbát na návrhový průtok korytem, při navržení nízkého návrhového průtoku bude docházet k vybřežení. Na některých místech nemusí být zatopení nivy na škodu, ale v intravilánu se poddimenzované koryto stává neefektivním a tím pádem nevyhovujícím. Opačným problémem je volba notně nadhodnoceného návrhového průtoky, při jehož aplikaci se realizace koryta vodního toku stává neekonomická díky nevyužitě kapacitě. Dalším aspektem návrhu příčného profilu koryta vodního toku je volba drsnosti, která také přímo ovlivňuje rychlost a tím průtok vody v korytu. V potaz se musí brát nejen drsnost samotného koryta, ale i „drsnost“ nivy a zatopeného území v intravilánu (Šedivý a kol. 2001).

Časový posun kulminace povodňové události se projevuje příznivě zejména na soutoku dvou a více vodních toků. Bez zpoždění kulminačních průtoků povodně hrozí na soutoku toků „potkání“ kulminací a jejich následné sečtení a zvýšení destrukčních účinků povodně (Šedivý a kol. 2001).

Revitalizace vodních toků je většinou chápána v souvislosti s volnou krajinou, ovšem do určité míry lze uskutečnit i revitalizaci vodního toku v obecní a městské zástavbě, kde jsou hlavními prioritami průtočná kapacita a stabilita koryta vodního toku. Ovšem cílem revitalizace v intravilánech měst a obcí by nemělo být jen základní zkapacitnění a stabilita koryta, ale mělo by se pohlížet i na ekologickou a estetickou

stránku věci. Mělo by se předcházet vytváření prizmatických neživotaschopných kanálů a dbát na zachování života a biodiverzity v revitalizovaném úsek (Just a kol. 2005).

Revitalizace vodních toků s protipovodňovým opatřením má mnohdy za následek ztrátu členitosti, oslabení biodiverzity, narušení srážkoodtokových vlastností vodního toku a podobně. Odstranění členitosti koryta vodního toku poškodilo bohatost přírody a krajiny a vodohospodářské funkce. Nahrazení přírodních členitých koryt prizmatickými kanály s hladce opevněnými břehy zmenšuje intenzitu procesů potřebných pro samočistící funkci vody, zmenšuje bohatost oživení vodního prostředí a zbavuje krajinu přirozeně estetického vjemu. Oslabení biodiverzity vodního ekosystému je způsobeno nemalými zásadními změnami prostředí dotýkajících se mnoha skupin vodních organismů. Podmínky pro výskyt a přežití jednotlivých druhů a společenstev jsou mnohdy natolik specifické, že plošné revitalizace vodních toků způsobily značné problémy pro přežití a řada druhů začala na upravených tocích strádat nebo úplně vymizely. Narušení přirozeného srážkoodtokového procesu při revitalizaci vodních toků má za následek rozkolísání režimu povrchových a podzemních vod a zvýraznění extrémů a s tím spojený nárůst eroze ploch u vodního toku a samotné eroze ve vodním toku, odnos splavenin a následné zanášení koryt vodních toků a vodních nádrží (Just a kol. 2005).

5.2.2 Les

Lesy jsou velmi důležité při protipovodňových opatření a to díky jejich velké schopnosti akumulovat vodu ze srážek. Velká lesní retence je zapříčiněna velkou schopností infiltrace do lesních půd a následným snížením rychlosti doběhu vody do toku je snížen podíl této vody na povodňové události. Na rychlost doběhu vody do vodního toku má v lesích vliv regulace rozsahu druhové a věkové skladby lesních porostů, jejich prostorové uspořádání, zdravotní stav stromů, hustota cestní sítě, svážnic a přibližovacích a vyklizovacích linek. V závislosti na sklonu území je rychlost doběhu povodně v lese přibližně 3 až 5krát nižší než v oblastech bez lesního pokryvu. Z toho vyplývá, že zalesněné lokality mají pozitivní vliv na prodloužení a zploštění hydrogramu povodňové události (Kantor a kol. 2003, Čamrová a kol 2006).

Mimo nemalou retenční schopnost, má lesní pokryv pozitivní účinek na mikroklima prostředí, který je patrný zvláště tehdy, porovná-li se zalesněná oblast s nezalesněnou. U nezalesněné oblasti může převážně v letních měsících docházet k přehřívání půdy a tím i k ovlivnění celkové teploty v prostředí. Zvýšená teplota má

za následek větší evapotranspiraci a tím i zvýšené hromadění vodních par v atmosféře, které se po poklesu teplot vrací v podobě intenzivních dešťů na zemský povrch. Odlesněná oblast, která byla příčinou této intenzivní srážky, nemá takovou retenční schopnost v porovnání se zalesněnou oblastí, aby tuto intenzivní srážku zvládla pojmout. V důsledku dochází k rychlému povrchovému odtoku a v některých případech i k bleskové povodni (Langhammer a kol. 2007).

Lesní porost jako protipovodňové opatření má ovšem význam jen pro povodně se spíše kratší dobou opakování, dalo by se dokonce říci, že zaručuje rovnoměrnější časové rozložení odtoku dešťových srážek tím, že zpomaluje odtok a následně ho nalepšuje v bezsrážkovém období. Další velmi významnou funkcí lesů je jejich nemalá protierozní ochrana (Čamrová a kol. 2006).

5.2.3 Zemědělská činnost

Zemědělské pozemky mají schopnost ovlivnit povodně s kratší dobou opakování díky jejich retenčnímu účinku, podobně jako je tomu u lesních ploch, pokud jsou vhodným způsobem obhospodařovány. Regulace zemědělské činnosti spočívající v zajištění určitého podílu trvalých travních porostů je také významným prostředkem v boji s půdní erozí. Usměrnění zemědělské činnosti za účelem protipovodňové a protierozní ochrany v ploše povodí je ovšem velmi obtížně prosaditelné, jelikož je ekonomicky náročné i z důvodu majetkoprávních komplikací, protože často zasahují do práv podstatně většího množství vlastníků řešeného pozemku než je tomu u lesů. Komplexní řešení protipovodňového opatření ve formě regulace zemědělské činnosti ve významných povodí se prokazatelně významným podílem na protipovodňové ochraně nejsou v České republice známa a jsou prozatím jen hypotetickou variantou (Čamrová a kol. 2006).

6 MODEL Y PRO SIMULACI POVODNÍ

Pojem model lze definovat jako popis principu fungování určitého procesu za použití informací z minulých událostí pro predikci událostí budoucích. Teoreticky lze říci, že je možno modelovat jakýkoliv proces. Nejčastěji využívaným přístupem k modelování jsou matematické reprezentace procesů. Matematické modely mají dlouhou historii, ale začaly se stávat významnými až zhruba v 80. letech 20. století s nástupem výpočetní techniky. Princip je založen na vyjádření algoritmu řešení soustavy rovnic, jenž popisují strukturu a chování systému. Modely pro hydrologické a vodohospodářské potřeby je možno rozdělit do dvou základních kategorií a to na modely hydrologické a hydraulické (Langhammer a kol. 2007).

Hydrologické modely zdůvodňují určité hydrologické prvky nebo jevy na určitou dobu do budoucnosti. Výsledky hydrologických modelů jsou podkladem pro tvorbu hydrologických předpovědí. Hydrologické předpovědi vycházející z jistoty předpovídaného prvku, na jejímž základě je předpověď netermínovaná nebo termínovaná. Do netermínovaných předpovědí patří určení N-letostí průtoků. Specifické jsou tím, že neudávají datum výskytu hodnoty predikovaného jevu. Termínované předpovědi lze definovat jako metody, u kterých jev nutně musí nastat, jelikož je důsledkem pozorovaného jevu, a proto je možné krom velikosti určit i dobu výskytu predikovaného jevu. Díky těmto vlastnostem je možné termínované předpovědi dále dělit na krátkodobé předpovědi a sezónní předpovědi (Pokorná a kol. 2008).

Základním hydrologickým modelem je srážkoodtokový model, který popisuje reakci zvoleného povodí na srážkovou událost. Reakce povodí na srážkovou událost ve srážkoodtokovém modelu má nejčastěji formu odtoku z povodí. Tyto výstupy bývají používány jako vstupní hodnoty do hydraulických modelů (Knebl 2005).

Existuje mnoho srážkoodtokových modelů založených na rozličných přístupech, ale většina z nich je postavena na fyzikálních přístupech (Bárdossy 2007).

Veškeré hydrologické modely je možno dělit na deterministické a stochastické. Deterministický přístup modelů spočívá v transformaci vstupu na výstup za pomoci fyzikálních principů bez vlivu náhodné složky. Dle přesnosti popisu fyzikálních zákonů jsou dále děleny na empirické modely (blackbox modely), konceptuální modely (greybox modely) a teoretické modely (whitebox modely). Stochastický přístup srážkoodtokového modelu je možno definovat jako model, ve kterém vstupy s výstupy

nejsou vzájemně provázány fyzikálními zákonitostmi a je v nich uvažována náhodná složka (Becker a kol. 1990).

Nejčastěji používanými srážkoodtokovými modely v České republice jsou HEC-HMS, Bilan, MIKE SHE (Jeníček 2005).

Hydraulické modely byly vytvořeny pro popis pohybu vody v otevřených korytech, potrubí a kanálech. Základními vstupními parametry jsou topografická data a drsnosti protékajících profilů. Základem hydraulických modelů jsou skutečné fyzikální zákonitosti (zákon zachování hmoty, energie, hybnosti) a výpočet parciálních diferenciálních rovnic, který umožňuje ve fyzikálních modelech potlačit na minimum stochastickou složku modelování. Řešení parciální diferenciální rovnice v hydraulickém modelování bývá velmi obtížné, a proto se pro výpočet využívá některého z výpočetních přístupů, nejčastěji metody konečných diferencí a metody konečných prvků. Nedílnou součástí tvorby modelu je zadání počátečních a okrajových podmínek (Brunner 2010).

Metoda konečných prvků je založena na vytvoření a rozprostření výpočetní sítě nad řešeným zájmovým územím a její funkční hodnoty jsou platné v celé síti, z čehož vyplývá, že síť může být tvořena různými geometrickými prvky. Díky možnosti využití různých geometrických prvků sítě při výpočtu je možno výpočetní síť lokálně zahušťovat v místech, kde je v zájmu vypočítat vyšší detail proudění a tím detailněji popsat vytipovaná kritická místa. Další výhodou metody konečných prvků je možnost měnit fyzikální vlastnosti jednotlivých oken sítě na základě získaných mezivýpočtů. Hlavní nevýhodou však jsou složité algoritmy při popisu částí, ze kterých je síť složena (Říha 1997).

Metoda konečných diferencí je starší než metoda konečných prvků. Také je založena na vytvoření sítě nad řešeným zájmovým územím, ovšem vytvořená síť je pravouhlá. Základní myšlenka spočívá v náhradě parciální diferenciální rovnice algoritmickým výrazem, jenž vyjadřuje podíl konečných diferencí závisle a nezávisle proměnných. Po nahrazení parciálních rovnic diferencemi je velikost difference rovna vzdálenosti dvou sousedních uzlů sítě a převedena na soustavu rovnic, které jsou dále řešeny přímými nebo nepřímými metodami. Zvolená velikost elementů sítě má přímý vliv na přesnost výpočtu, ale tím i na zvýšení množství výpočetního času řešeného zájmového území (Říha 1997).

Další přístup k tvorbě hydraulických modelů spočívá v míře zjednodušení pohybových rovnic, na jejichž základě jsou koncipovány hydraulické modely 1D, 2D a 3D. Každý z nich má jiné vyjádření rychlosti, směru proudění a výšky hladiny.

U těchto modelů je třeba vhodně zvolit drsnosti koryta, které jsou většinou odvozovány z kalibrace 1D modelů. Jedná se především o makrodrsnosti a mikrodrsnosti koryta, odpory proudu vyvolané vnitřním třením kapaliny a turbulencí proudu. Ze současných poznatků je patrné, že při modelování povodňových průtoků jsou součinitelé drsnosti společně s geometrií koryta hlavními faktory pro ovlivnění vodního stavu v toku (Bernard a kol. 2007, Jowett a kol. 2012, Vodní hospodářství 61(8)).

1D model predikuje hloubku a střední svislicovou rychlost v celém profilu a prostředí je definováno geometrickými a hydraulickými parametry vhodně zvoleného souboru příčných profilů. Tyto modely je možné použít jak na ustálené proudění (průtok v čase konstantní), tak na proudění neustálené (průtok v čase proměnný) za reálných povodňových situací. Mezi základní vstupní parametry modelu patří zaměření příčných profilů. Profily se musí volit tak, aby mezi sousedními bylo možno uplatnit předpoklad lineárního průběhu geometrických a hydraulických parametrů. Dalšími parametry jsou volba návrhového a kontrolního návrhového průtoku, případně hydrogram N-leté povodňové události (horní okrajová podmínka), dolní okrajová podmínka tvořená známou hladinou, konzumční křivkou, sklonem dna nebo kritickou hloubkou, dále drsnosti koryta toku a jejich distribuce v příčných profilech a definování průtočných a neprůtočných oblastí v příčném profilu. Model je schopen vytvořit výstupy reprezentující podélný sklon hladiny v celé zkoumané oblasti, úroveň hladiny v jednotlivých příčných profilech, prostorový rozliv v modelované lokalitě a průměrné rychlosti proudění v příčných profilech včetně objektů na toku, kterými jsou například mostní konstrukce, jezová tělesa, propustky. Některé sofistikovanější modely jsou schopné dodat rozdělení podélných rychlostí proudění v příčném profilu, ovšem pouze v přímých případně prizmatických úsecích toku, u nichž lze počítat s tím, že převládá podélná složka proudění. Při akceptování tohoto aspektu je patrné, že je nemožné realizovat rozdělení podélných rychlostí v profilu u meandrujících koryt a v širokých inundačních území, jelikož v těchto případech není podélná složka proudění dominantní a uplatňují se i zbylé směry toku. Tímto složitým prouděním se zabývá 2D a 3D modelování. Mezi nejpoužívanější typy 1D modelů patří HYDROCHECK 3, MIKE 11, HEC-RAC (Balvín a kol. 2009, Jowett a kol. 2012).

2D model simuluje rychlost toku v podélném a příčném směru proudění a vodní stav ve všech bodech výpočetní sítě. Tento přístup v modelování se využívá v případech, kdy už 1D model nevyhovuje, u simulací s vyššími požadavky na znázornění distribuce proudění, u rozsáhlých meandrujících toků a u širokých

a členitých inundačních území. S 2D modely lze řešit ustálené i neustálené proudění. Model podává vcelku věrohodné proudové poměry, jako jsou průběhy proudnic, vektory středních svislicových rychlostí a izolinie hladin v plochém území, dále uspokojivě předkládá vliv jednotlivých překážek na proudové pole, hydrodynamické vlivy proudící vody na mostní konstrukce a podobně. Matematický popis proudění je realizován za pomoci parciálních diferenciálních rovnic, které jsou numericky řešeny nejčastěji metodou konečných diferencí, konečných prvků nebo konečných objemů. Přesnost výsledků modelu je v přímé souvislosti především se vstupními podklady, s volbou sítě uzlových bodů a její hustotou. Ovšem z těchto požadavků vznikají nároky na vysokou kvalitu vstupních dat a s tím spojený potřebný výkon a paměť počítače. Mezi vstupní parametry patří podrobné tachymetrické zaměření modelovaného úseku vodního toku a přilehlého inundačního území (podklady pro tvorbu trojrozměrného modelu terénu), návrhový průtok a kontrolní návrhový průtok, případně hydrogram N-leté povodně v modelované lokalitě, okrajové podmínky v obou okrajových profilech modelovaného úseku toku (lze zadávat i různé rozdělení průtoků nebo rychlostí podél okrajového profilu), drsnost koryta toku a inundačního území a jejich změny v podélném příčném profilu, dále je zapotřebí granulometrie dnového materiálu, jestliže jsou řešeny morfologické změny koryta toku. Nejvyžívanějšími 2D modely jsou SHALLOW, FAST 2D, FLUVIUS, MIKE 21 a další (Balvín a kol. 2009, Bernard a kol. 2007).

3D model má schopnost předpovídat směr a rychlost proudění ve všech složkách směru (podélná, příčná a vertikální) a vodní stav v každém bodě výpočetní sítě. Tyto modely jsou vhodné především pro simulaci proudění u velmi složitých proudění, která se vyskytují převážně u staveb na toku. U mostních konstrukcí, obzvláště pak u středových a břehových podpěr mostů, propustků a dalších obdobných staveb je nutno zjistit, zda dojde či nedojde k překročení vymílacích rychlostí a jiným výjimečným stavům na vodním díle. Pomocí 3D matematických modelů by teoreticky šlo modelovat i proudění nejen u objektů na toku, ale i proudění samotného toku. To ovšem naráží na úskalí nedostatečného výpočetního výkonu, proto se dlouhé říční úseky modelují za pomoci kombinace 2D a 3D schématisace, kde se v první řadě za pomoci 2D vyšetří rychlostní pole proudění a rychlosti před zkoumaným objektem, které slouží jako vstupní okrajové podmínky, na kterých je zkoumáno prostorové rozdělení rychlostí ve 3D simulaci. Příkladem používaných softwarů je COMSOL Multiphysics (dříve FEMLAB) a MIKE SHE (Balvín a kol. 2009, Bernard a kol. 2007, Jowett a kol. 2012).

6.1 HEC-RAS

Matematický model HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) byl vyvinut ministerstvem obrany USA a patří do produktů Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. Hlavním úkolem hydraulického modelu HEC-RAS je analýza říční sítě, především je využíván pro stanovení stavu vodní hladiny při návrhovém průtoku v korytě a s tím související stanovení záplavových území ve smyslu výpočtu 1D proudění ustáleného případně neustáleného proudění. Dále se dá využít na modelování transportu sedimentu a kvality vody. Software HEC-RAS pracuje na principu výpočtu soustavy Sait Venantových rovnic (Vzorec 2).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(UQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - J_0 \right) + gAJ_E = 0$$

Vzorec 2: Soustava Sait Venantových rovnic (Warner a kol. 2010)

Kde Q je návrhový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}$), A je průměrná plocha (m^2), t je čas (s), g je gravitační zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), U je střední rychlost proudění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), x je vzdálenost od osy toku (m), J_0 je sklon dna (-), J_e je sklon čáry energie (-) (Valentová a kol. 2006, Warner a kol. 2010).

Výpočet ustáleného proudění za pomoci modelu HEC-RAS je proveden metodou po úsecích, která je v modelu počítána 1D rovnicí pro úsek, jenž je vymezen dvojicí sousedních příčných profilů a v každém z těchto profilů je proveden výpočet rychlosti proudění a vodního stavu (Vzorec 3).

$$Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} - h_e$$

Vzorec 3: Metoda po úsecích (Valentová a kol. 2005)

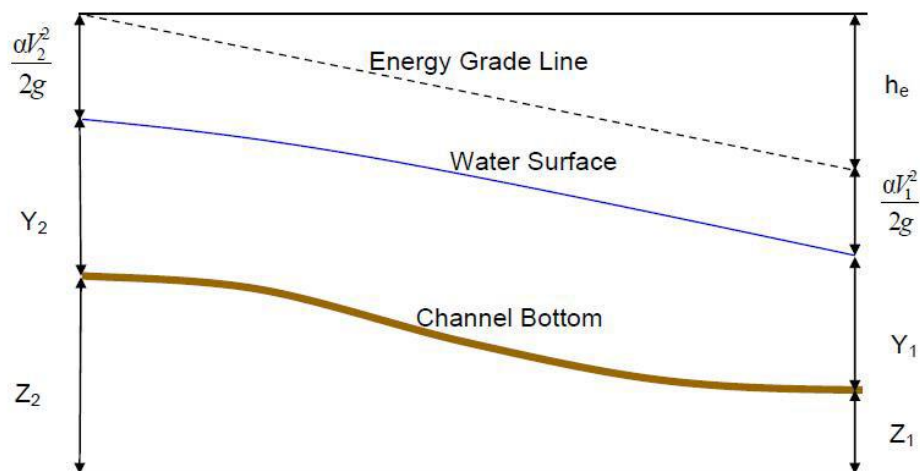
Kde Z_1 a Z_2 je výška dna v profilech jedna a dva (m), Y_1 a Y_2 je vodní stav v profilech jedna a dva (m), V_1 a V_2 je průtočná průřezová rychlost v profilech jedna a dva ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), a_1 a a_2 je rychlostní koeficient v profilech jedna a dva (-), g je gravitační zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), h_e je energetická ztráta (m).

Energetická ztráta udává míru sklonu energetického horizontu proudění (Vzorec 4) a je možné ji vyznačit graficky (Obr. 1), (Valentová a kol. 2006).

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Vzorec 4: Energetická ztráta (Valentová a kol. 2006)

Kde L je vzdálenost profilů (m), \bar{S}_f je drsnost mezi profily (-), C je koeficient místních ztrát (-).



Obrázek 1: Energetické ztráty (Knebl a kol. 2005)

Pro fungování modelu HEC-RAS je třeba zadat vstupní parametry zkoumaného vodního toku. Mezi tyto parametry patří návrhový průtok (Q_N), který je získán z hydrologických srážkoodtokových modelů, příčné profily vodního toku se zaznamenávají břehovou linií, koeficienty drsností (Manningův drsnostní součinitel n) a koeficienty změny tvaru koryta (Knebl a kol. 2005).

Návrhový průtok (Q_N) je maximální průtok, který je dosažen nebo překročen v dlouhodobém průměru jednou za N -let. Jedná se o hydrologickou charakteristiku a základní stavební kámen vodohospodářských opatření. Návrhové průtoky se nejčastěji stanovují a udávají s dobou opakování 1, 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let (Hrádek a kol. 2002).

Příčné profily vodního toku lze získat mnoha způsoby. Nejpřesnější metodou je geodetické zaměření, ale toto získání příčných profilů je nákladné a poněkud zdlouhavé, jedná-li se o velké projekty. Další možnost získání příčných profilů reprezentuje metoda leteckého laserového zaměření, kde se za pomoci letadla bodově skenuje reliéf terénu a za použití vhodných softwarů (ArcGIS a podobně) lze získat digitální model reliéfu. Výhodou digitálních modelů reliéfu jsou jejich relativně nízké náklady na pořízení s ohledem na velikost skenované plochy. Nejzásadnější

nevýhodou je, že měřící laserový paprsek neprojde vodní hladinou, což je při snaze o získání příčných profilů vodního toku vcelku zásadní věc, a proto musí být koryto dodatečně „zahloubeno“. Ovšem digitální model reliéfu má velkou sílu při určování inundačních území, a proto je pro komplexní řešení vodohospodářské ochrany před povodněmi vhodné kombinovat digitální model reliéfu s geodetickým zaměřením vodního toku, (Roub a kol. 2012).

Pro správnou funkci modelu je třeba stanovit drsnosti modelovaného koryta vodního toku. Pojmem stanovení drsností je rozuměno stanovení hydraulického odporu v korytě toku. Parametr drsnosti koryta stojí z hlediska významnosti po geometrii koryta při ovlivnění výšky vodního stavu v korytě na druhém místě. Hydraulické odpory působící v korytě toku vznikají díky materiálu dna a svahů, výskytem vegetace, dnovými útvary, různými nerovnostmi, prohlubněmi a nánosy. Pro určení míry uplatnění drsnosti koryta na průtok lze využít několik přístupů, přičemž nejpoužívanější je Chézyho rychlostní součinitel podle Manninga (Vzorec 5), dále pak například Darcy – Weisbachův součinitel ztrát třením.

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

Vzorec 5: Chézyho rychlostní součinitel dle Manninga (Havlíček 2013)

Kde C je Chézyho rychlostní součinitel (-), n je drsnost (-), R je hydraulický poloměr (m). Ze získaného Chézyho rychlostního součinitele je dále vypočítána Chézyho rychlost proudění v korytě (Vzorec 6).

$$v = C * \sqrt{RI}$$

Vzorec 6: Střední průřezová rychlost (Havlíček 2013)

Kde v je střední rychlost proudění (m·s⁻¹), C je Chézyho rychlostní součinitel (m^{0.5}·s⁻¹), I sklon čáry energie (-), který je pro rovnoměrné proudění roven sklonu dna koryta toku.

Pro určení koeficientů drsností lze využít několika možností, z nichž jsou nejpoužívanější katalogy drsností, empirické vzorce a měření v laboratorních podmínkách a nejčastěji bývají uváděny jako Manningův drsnostní součinitel. Použití Manningova drsnostního součinitele má však svá úskalí, která spočívají v uplatněném odhadu vycházejícího ze zkušenosti odhadovatele, díky kterému se výsledné hodnoty mohou lišit až o několik procent. Testováním odchylek odhadů drsnostního součinitele bylo prokázáno, že změna odhadu drsnostního součinitele ve výši 10 % se projeví na změně vodního stavu ve výši 5 % (Havlíček 2013).

7 METODIKA

Pro sepsání odborné rešerše byly použity odborné publikace, články z odborných časopisů a internetové zdroje. Veškeré použité zdroje jsou zaneseny v kapitole 11 Literatura a použité zdroje. Rešerše pojednává o problematice povodní, protipovodňové ochrany a zmiňuje se o nejvýznamnějších povodních na našem území.

Pro vytvoření modelu povodňových událostí byl využit 1D model HEC-RAS s před přípravou v softwaru ArcGIS 10.2.2 s nástavbou HEC-GeoRAS. Potřebná data pro zpracování byla získána od Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního, který poskytl digitální model reliéfu ČR 5. generace složený z mapových listů Humpolec 5-6, Humpolec 5-7, Humpolec 6-3, Humpolec 6-4, Humpolec 6-6, Humpolec 6-7, Humpolec 7-4, Humpolec 7-5, Humpolec 7-6, Humpolec 8-5 ve formátu .xyz. Další várka dat byla získána od Povodí Vltavy s. p. (dále jen „PVL“) a jednalo se o příčné profily, podélný profil, objekty na toku a předpoklady drsností zájmového území. Data poskytnutá povodím byla ve formátu .dwg.

I přes předpokládanou správnost dat proběhl od 18. do 20. března 2016 terénní průzkum, který měl za účel přesnější určení drsností, nafocení a vizuální kontrolu veškerých objektů na zvolené části toku a vizuální kontrolu shody příčných profilů. Terénním průzkumem byla potvrzena přesnost dat a určeny drsnosti pro jednotlivé úseky toku, které jsou zaneseny v tabulce 2. Dále bylo přistoupeno k tvorbě modelu za využití softwaru ArcGIS s nástrojem GeoRAS a softwaru HEC-RAS.

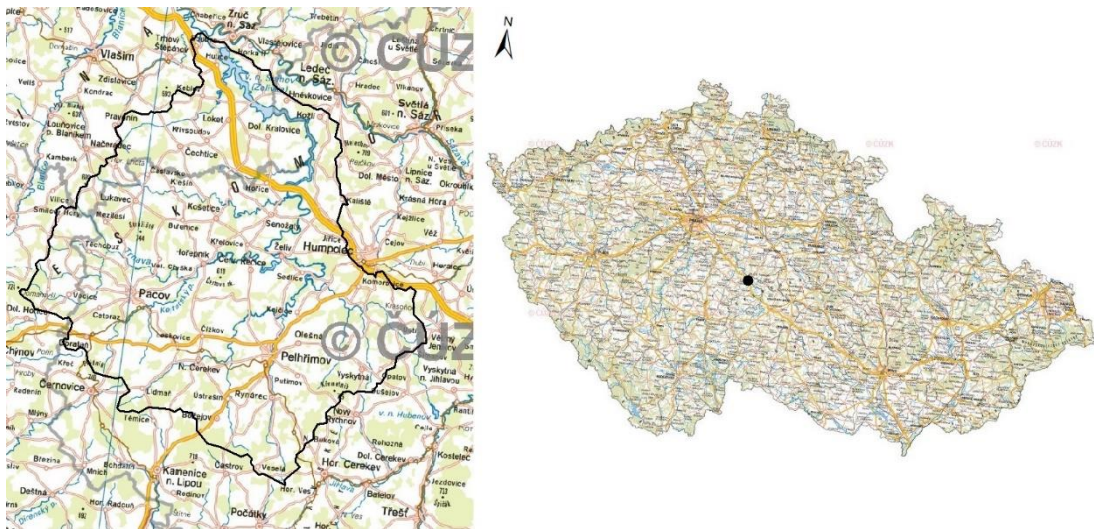
Tabulka 2: Manningovy drsnostní součinitele (zdroj: PVL 2014)

Koryto	Břeh	Travní porost	Les	Zástavba	Silnice
0,025-0,06	0,03-0,1	0,04-0,07	0,1-0,12	0,14-0,2	0,03

7.1 Povodí Želivka

Povodí vodního toku Želivka na obrázku 2 hydrologického pořadí 1-09-02-001 zaujímá rozlohu 1188,4 km², s délkou údolí 103,89 km, charakteristikou tvaru povodí 0,13 a lesnatostí 30 % je součástí dílčího povodí Dolní Vltava vymezeného vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 393/2010 Sb., o oblastech povodí. Povodí v rámci administrativního členění krajů leží ze 76,7 % v kraji Vysočina, 18,5 % ve Středočeském kraji a zbylé území odpovídající ploše 4,8 % se nachází v Jihočeském kraji (PVL 2014).

Povodí Želivka náleží podle geomorfologického členění do subprovincie Česko-moravské soustavy, oblastí Českomoravské vrchoviny a okrajově na severozápadě do Středočeské pahorkatiny. Z Českomoravské vrchoviny náleží do celku Křemešnická vrchovina a podcelků Pacovská pahorkatina, Humpolecká vrchovina a Želivská pahorkatina. Ze Středočeské pahorkatiny náleží do celku Vlašimská pahorkatina s podcelkem Mladovožická pahorkatina. Nejvyšším bodem v povodí je Křemešník s výškou 765 m n. m. ležícím na jihovýchodní hranici povodí v Humpolecké vrchovině. Nejnižším místem v povodí je soutok se Sázavou s výškou 317 m n. m. (PVL 2014).



Obrázek 2: Povodí Želivka (ČÚZK, autor)

Povodí Želivky se rozprostírá v západní části hydrogeologického rajónu Krystalinikum v povodí Sázavy, kde horniny krystalinika mají sníženou puklinovou propustnost, jenž v dosahu zvětrávacích procesů závisí na charakteru zvětralin. Lepší puklinovou propustnost mají granitoidy moldanubického plutonu vyskytující se v jižní části území. Z kvartérních sedimentů mají větší hydrogeologický význam fluvialní akumulace sedimentů údolních niv a některá mocnější eluvia. Pro povodí jsou typické mělké zvodně vázané na povrchovou zónu kvartérních uloženin, zónu zvětrávání, případně přípovrchové rozpojení hornin. Oběh vody je lokálního charakteru a infiltrace probíhá v celé ploše kolektoru v závislosti na propustnosti zvětralého pláště a k odvodňování dochází v úrovni nebo nad úrovní erozní báze (PVL 2014).

Vodní tok Želivka (v horní části též nazývaný Hejlovka) je tokem 3. řádu. Je levostranným přítokem řeky Sázavy, do které ústí pod městem Zruč nad Sázavou. Pramení v Křemešnické vrchovině na severním svahu Trojáku, který se nachází přibližně 10 km od města Pelhřimov v nadmořské výšce 677,25 m. Průměrný průtok

na ústí do Sázavy je roven $7 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Délka toku činí 103,89 km s plochou povodí 1188,4 km². V povodí se vyskytuje 136 vodních ploch s rozlohou větší než 1 ha, jejich celková plocha dosahuje 1935,8 ha. Největší je vodní nádrž Švihov o ploše 1396,6 ha, která slouží primárně jako zásobárna pitné vody pro téměř celou středočeskou oblast včetně Prahy a další regiony v povodí Želivky. Hlavními přítoky jsou v jižní části pravostranné přítoky řeky Bělá a Jankovský potok, ve střední části levostranné přítoky řek Trnava a Martinický potok a v severní části se z levé strany vlévá přímo do vodní nádrže Švihov Sedlický potok. Spád řeky v horní části toku přibližně po 95 ř. km je poměrně velký a činí až 4 %, ve střední části povodí se sklon pohybuje v rozmezí okolo 0,2-0,4 %. Střední sklon řeky je 3,46 ‰. Nejvýznamnějšími vodními nádržemi v povodí Želivky jsou vodní nádrž Švihov ležící na 4,29 ř. km s dosahem vzdutí do 43,4 ř. km se zatopenou plochou 1602,6 ha sloužící jako zásobárna pitné vody o objemu 309 mil·m³, dále pak vodní nádrž Sedlice se zatopenou plochou 38,3 ha, jejíž funkce spočívá v zachycení splavenin na přítoku do vodní nádrže Švihov a ve výrobě elektrické energie o objemu 2,22 mil·m³, dále ještě vodní nádrž Vřesník o celkovém objemu 0,37 mil·m³ a zatopenou plochou 17,1 ha, s primárním účelem vyrovnávací nádrže pod vodní elektrárnou Sedlice, poté vodní nádrž Trnávka o objemu 6,68 mil·m³ a zatopené ploše 98 ha na řece Trnava sloužící k zachycení splavenin na přítoku do vodní nádrže Švihov a nakonec vodní nádrž Němčice Švihov o objemu 1,16 mil·m³ a ploše 24,7 ha vybudována na Sedlickém potoce s funkcí zachycení splavenin na přítoku do vodní nádrže Švihov. Hydrologické poměry povodí včetně ovlivnění režimu nádrže Švihov zachycuje stanice Želivka – Soutice, která měří od roku 1973. Stanice leží zhruba 3 km pod hrází vodního díla a 1,25 km před soutokem se Sázavou. V povodí je dohromady 8 měrných stanic, jejichž základní průtokové charakteristiky jsou zaneseny v tabulce 3 (PVL 2014).

Tabulka 3: Průtokové charakteristiky stanic (zdroj: PVL 2014)

Profil	Vodní tok	ČHP	Plocha [km ²]	Q _a	N-leté průtoky (m ³ ·s ⁻¹)				
					Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Čakovice	Hejlovka	1-09-02-009	12,069	0,77	11,5	25	32	51,5	60,5
Pelhřimov	Bělá	1-09-02-018	94,19	0,54	10,4	22,8	29,4	47,1	55,9
Milotice	Jankovský p.	1-09-002-032	128,82	0,8	13	27,5	35	56	66
Želiv	Želivka	1-09-002-035	431,23	2,68	32	67	85	133	157
Hořepník	Trnava	1-09-002-060	260,11	1,6	20,9	44,3	56,4	88,3	104
Červená Řečice	Trnava	1-09-002-069	317,77	1,94	20,4	45,2	58,5	94,2	112
Poříčí	Želivka	1-09-002-069	780,01	4,79	49	103	131	204	240
Soutice	Želivka	1-09-002-109	1186,69	4,97	72	144	180	274	318

Povodí Želivka se řadí mezi vodní toky dešťovo-sněhového typu s průměrným ročním úhrnem 679 mm, odtokovým součinitelem 0,28 a specifickým odtokem z povodí 6,05 l·s⁻¹·km⁻² (PVL 2014).

Pedologické poměry v povodí jsou zastoupeny 75,7 % hnědou půdou, 16,8 % půdou glejovou, 5,1 % pseudoglejemi a 2,4 nivními půdami (PVL 2014).

V povodí se nachází mnoho měst a obcí s rozvinutou infrastrukturou. Převážná část nezastavěné a nezalesněné plochy je využívána jako orná půda a zbytek jako louky (PVL 2014).

7.1.1 Zájmové území

Řešená část vodního toku Želivka je v rozmezí od 41,6182 ř. km do 63,8893 ř. km. Tento úsek řeky byl zvolen z důvodu vysokého rizika výskytu povodňových událostí. Je vymezen hrází vodní nádrže Sedlice (63,8893 ř. km) a dosahem vzdušné vodní nádrže Švihov (41,6182 ř. km). Ve zvoleném úseku se nachází několik obcí, chatařských oblastí a usedlostí. Mezi obce v blízkosti toku se nachází Želiv, Poříčí, Bolechov, Tukleky, Lhotice, Miletín, Lísky a Otavožaty. Usedlostmi na toku jsou Na Seči, Kordovsko, Rokosův Mlýn, Valchy, U Maliny, Podskalský, Tuklecký Mlýn, Závodí, Býkovka, V Ráji, Bělský Mlýn a Bělský Dvůr. Chatové oblasti jsou bez oficiálních názvů. V zájmovém území se nachází několik objektů na toku, kterými je jedna vodní nádrž, šest jezů, pět silničních mostů, dvě lávky, jedna čistírna odpadních vod a jedna malá vodní elektrárna. Drsnost ve formě Manningova drsnostního součinitele n byla stanovena pro koryto v rozmezí 0,025 až 0,06, pro břehy 0,03 až 0,1 a pro inundatní území 0,04 až 0,2. Jako výchozí průtočné profily byly použity PF 49, PF 89, PF 124, PF 195, PF 227 s hodnotami N -letostí zanesenými v tabulce 4.

Tabulka 4: N -leté průtoky profilů (PVL 2014)

Profil	Průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)						
	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
PF 49	51,4	73,5	107,3	136	167,1	211,7	248,6
PF 89	50,2	71,8	104,9	133	163,4	207,1	243,3
PF 124	32,2	46,2	67,8	86,1	105,9	134,5	158,2
PF 195	30,9	44,3	65,1	82,7	101,7	129,3	152,1
PF 227	22,2	32	47,2	60,1	74,1	94,4	111,3

Začátek zájmového území leží pod vodním dílem Sedlice na obrázku 3 na 63,913 ř. km. Nádrž byla vybudována za účelem akumulace vody pro vodní elektrárnu Sedlice ležící níže na toku a pro zachycení splavenin před vodní nádrží Švihov. Jedná se o zděnou gravitační hráz z lomeného kamene, obloženou žulovými kvádry, s nehrazenými korunovými bezpečnostními přelivy, s délkou 118 m a výškou 14,22 m. Nad hrází je vybudovaná vozovka o šířce 5 m. Hráz je vystavěna do oblouku

s poloměrem 180 m. Vzduť dosahuje do 66,0 ř. km, celková zatopená plocha je 38,3 ha a zadržný objem 2,22 mil. m³. Vodní dílo Sedlice bylo uvedeno do provozu roku 1928.



Obrázek 3: Vodní nádrž Sedlice (autor)

Nejvýznamnějším objektem na řešeném úseku toku je vodní nádrž Vřesník na obrázku 4 s hrází nacházející se na 55,484 ř. km. Nádrž slouží jako vyrovnávací pro vodní elektrárnu umístěnou výše na toku a pro usazování splavenin před vodní nádrží Švihov. Jedná se o přímou zděnou gravitační hráz z lomeného kamene, obloženou žulovými kvádry, s nehrazenými korunovými bezpečnostními přelivy, s délkou 78 m a výškou 6,1 m. Vzduť dosahuje do 56,2 ř. km, celková zatopená plocha je 17,1 ha a zadržný objem 0,37 mil. m³. Vodní dílo Vřesník bylo uvedeno do provozu roku 1928.



Obrázek 4: Vodní nádrž Vřesník (autor)

Dalšími významnými objekty upravujícími vodní režim proudění na toku jsou jezy. Konkrétně se jedná o pevný jez Bělský mlýn na obrázku 5 nacházející se na 41,723 ř. km. Jedná se o pevný kamenný jez s odbočením náhonu na přilehlý Bělský mlýn. Délka jezu činní 70 m a výška tělesa 1,4 m. Koruna jezu se nachází 377,6 m n. m.



Obrázek 5: Jez Bělský mlýn (autor)

Následujícím jezem je pevný jez Lhotice na obrázku 6, který leží na 44,757 ř. km. Jedná se o kamenný, částečně betonový pevný jez s odbočením náhonu, který se v dnešní době nevyužívá. Je neudržovaný a v havarijním stavu. Výška tělesa je 1,8 m, koruna jezu se nachází 381,82 m n. m.



Obrázek 6: Jez Lhotice (autor)

Následuje pevný jez Tukleky na obrázku 7 vybudovaný na 48,757 ř. km. Tuklefský jez je kamenitě pravidelné konstrukce s délkou 49 m a výškou tělesa 1 m. Koruna jezu se nachází 388,09 m n. m.



Obrázek 7: Jez Tukleky (autor)

Dalším jezem na toku je pevný jez Želiv na obrázku 8 vybudovaný na 53,847 ř. km. Želivský jez je kamenný pravidelný jez s odvodňovacím kanálem a malou vodní elektrárnou. Délka tělesa je 56 m a výška 1,43 m, koruna jezu se nachází 398 m n. m.



Obrázek 8: Jez Želiv (autor)

Předposledním jezem v zájmovém území je pevný jez Rokosův mlýn na obrázku 9 na 59,89 ř. km. Je to kamenný pravidelný jez s propustí uprostřed, délka tělesa dosahuje 37 m, výška 2,5 m a koruna jezu se nachází 424,4 m n. m.



Obrázek 9: Jez Rokosův mlýn (autor)

Posledním jezem na zvoleném úseku toku je jez Kordovsko na obrázku 10 na 63,28 ř. km. Jde o kamenný pravidelný jez s délkou tělesa 31 m, výškou 1,45 m a korunou jezu nacházející se 433,25 m n. m.



Obrázek 10: Jez Kordovsko (autor)

Prvním mostem v zájmovém území je silniční most na silnici č. 130 mezi Miletínem a Senožaty na obrázku 11 na 43,415 ř. km. Most je trémového typu železobetonové konstrukce s délkou 100 m. Mostovka je 5,65 m vysoko nad hladinou

řeky při průtoku Q_{355} . Výška mostovky je 1,9 m a šířka 13 m, trubkové zábradlí je vysoké 1 m. Most je složen ze tří polí, pilíře podpírající mostovku jsou umístěny po jednom na každém břehu řeky a jsou od sebe vzdáleny 30 m a mají kruhový půdorys o průměru 1,46 m.



Obrázek 11: Most Miletín – Senožaty (autor)

Dalším mostem na toku je silniční most silnice č. 129 mezi obcemi Křelovice a Želiv na obrázku 12 na 52,468 ř. km. Most je jednopolevý trémového typu železobetonové konstrukce s délkou 25 m a výškou 4,8 m nad hladinou toku při průtoku Q_{355} . Mostovka je 2 m vysoká a 8 m široká s 1,2 m vysokým trubním plotem. Patky mostu jsou na březích řeky s rozponem 18,8 m.



Obrázek 12: Most Křelovice – Želiv (autor)

K mostu jsou přidružená dvě inundační pole na obrázku 13 s polokruhovými poli o poloměru 3,71 m a s průtočnou plochou 21,6 m². Mostovka je v nejužším místě vysoká 1,7 m a má totožnou šířkou jako most. Je osazena svodidly o výšce 0,45 m.



Obrázek 13: Inundační pole Křelovice – Želiv (autor)

Následujícím mostem na toku je silniční most v obci Želiv vedoucí z hlavní silnice ke klášteru na obrázku 14 na 53,053 ř. km. Most je třípolový trémového typu železobetonové konstrukce s délkou 36 m a výškou 3,42 m nad hladinou toku při průtoku Q_{355} . Mostovka je 2 m vysoká, 4 m široká a osazena 1 m vysokým trubním zábradlím. Pilíře obdélníkového půdorysu s rozměrem 2,4 m jsou umístěny na břehu toku s rozponem 13,2 m.



Obrázek 14: Most Želiv – klášter (autor)

Další most v pořadí se také nachází v obci Želiv. Jedná se o silniční most vedoucí z hlavní silnice směrem na obec Sedlice na obrázku 15 na 54,017 m n. m. Most je dvoupolový trémového typu železobetonové konstrukce s délkou 40 m a výškou 2 m nad hladinou toku při průtoku Q_{355} . Mostovka je 1,55 m vysoká, 12 m

široká, s 1,1 m vysokým trubním zábradlím. Je umístěna na dvou patkách, po jedné na každém břehu toku, ve středu toku je podpírána jedním pilířem obdélníkového půdorysu s šířkou 2 m. Spon patky a pilíře činí 18,6 m.



Obrázek 15: Most Želiv – Sedlice (autor)

Posledním mostem v zájmovém území je most u vodní elektrárny Sedlice na obrázku 16 na 57,49 ř. km. Jedná se o silniční třípolový most trémového typu železobetonové konstrukce s délkou 44 m a výškou 4,3 m nad hladinou toku při průtoku Q_{355} . Mostovka je klenutá s výškou 1,18 m v nejsilnějším místě a 0,9 m v nejužším místě, s šířkou 2,5 m a s 1,1 m vysokým trubkovým plotem. Je podepřena dvěma pilíři, přičemž jeden pilíř je umístěn na pravém břehu a jeden ve středu toku. Jsou obdélníkového půdorysu o šířce 1,6 m a rozponem dosahuje 13 m.



Obrázek 16: Most vodní elektrárna Sedlice (autor)

První lávkou na toku je ocelová příhradová lávka u obce Poříčí na obrázku 17 na 50,950 ř. km. Dosahuje délky 30 m. Je posazena na dvou betonových pilířích obdélníkového půdorysu o šířce 1,8 m a sponem 15,4 m. Koncová patka je 1,1 m široká a vzdálená 4,54 m od levého pilíře. Pravý pilíř je umístěn na břehu toku a levý v toku. Pojezdová fošnová část je 1,5 m široká a 2,9 m vysoko nad hladinou řeky při průtoku Q_{355} .



Obrázek 17: Lávka Poříčí (autor)

Druhá lávka je v obci Želiv na obrázku 18 na 54,325 ř. km. Délka ocelové lávky na betonovém pilíři trámového typu dosahuje 20 m. Betonový pilíř obdélníkového půdorysu o šířce 1 m je umístěn ve středu toku a od patek je vzdálen 9,3 m. Pojezdná fošnová část je 1,3 m široká a 1,4 m vysoko nad hladinou řeky při průtoku Q_{355} .



Obrázek 18: Lávka Želiv (autor)

Vodní elektrárna Sedlice na obrázku 19 na 57,51 ř. km plní funkci špičkové elektrárny. Je dotována akumulovanou vodou z vodní nádrže Sedlice položené výše na toku a vyrovnávací nádrží Vřesník ležící nedaleko pod elektrárnou. Voda je přiváděna štolou dlouhou 856 m s účinným spádem 36 m. Elektrárna je osazena třemi Francisovými turbínami horizontálního provedení s celkovou hltností $8,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a výrobou přibližně $6,5 \text{ mil. kW} \cdot \text{rok}^{-1}$.



Obrázek 19: Vodní elektrárna Sedlice (autor)

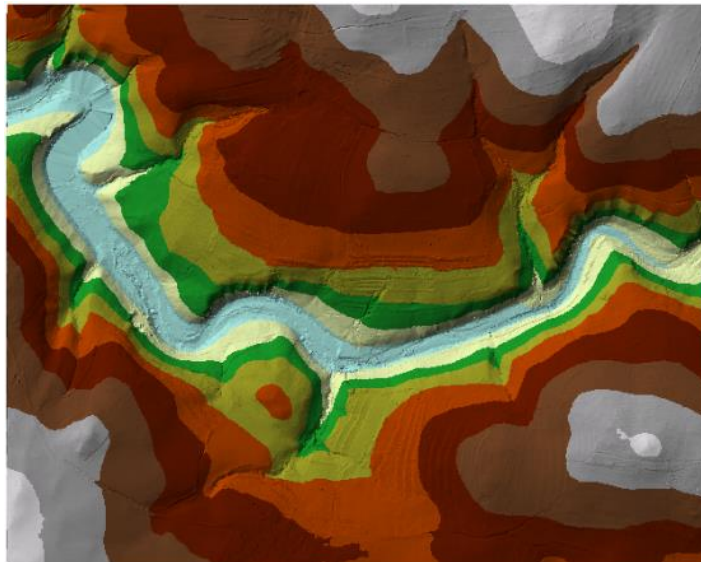
7.2 Tvorba modelu

Pro přípravu komplexního modelu je využito softwaru ArcGIS a jeho nástavby HEC-GeoRAS a poté jsou výstupy exportovány do HEC-RAS, kde se provedou výpočty proudění. Je třeba mít na paměti, že HEC-RAS je americkým softwarem a tudíž si nedokáže poradit s českou diakritikou, proto je nutno veškeré názvy a atributy v atributových tabulkách zadávat bez háčeků a čárek, stejně jako cesty k datům. Další doporučení spočívá ve vyvarování se používání mezer a případným nahrazením podtržítkem (_). Při nedodržení těchto pravidel by při konečném exportu mohlo dojít k chybě, která by značně zkomplikovala dosavadní odvedenou práci.


7.2.1 Příprava vstupních dat v ArcGIS

Prvním vstupem do tvorby modelu je výškopisný model povrchu. Při tvorbě modelu simulace povodňových průtoků na řece Želivka byl použit digitální model reliéfu ČR 5. generace, který byl do ArcGISu vložen pomocí nástroje z *TOOLBOX* → *3D Analyst Tools* → *Conversion* → *From File* → *ASCII 3D to Feature Class*. Do dialogového okna byl zadán souřadnicový systém S-JTSK_Krovak_East_North,

dále byl zvolen vstup nástroje, který je reprezentován digitálním modelem reliéfu 5. generace, určen název a místo uložení výstupní vrstvy a zadán koeficient odstupu 1. Po aplikování nástroje vznikla bodová vrstva, kterou je třeba převést na vrstvu TIN, která reprezentuje samotné nadmořské výšky pomocí spojených bodů nepravidelnými trojúhelníky. Vrstva TIN byla vytvořena *TOOLBOX* → *3D Analyst Tools* → *Data Management* → *TIN* → *Create TIN* a výsledek je patrný na obrázku 20.



Obrázek 20: TIN (autor)



Další krok v přípravě vstupních dat do HEC-RAS spočívá ve vytvoření říční sítě. Při tvorbě modelu simulace povodňových průtoků na řece Želivka byl však vytvořen jen hlavní tok, jelikož v řešeném území jsou přítoky ostatních řek zanedbatelné. První vytvořenou vrstvou je polylinie osy toku zhotovená pomocí nástroje *RAS Geometry* → *Create RAS Layers* → *StreamCentraline*. Při zvolení nástroje je opět nutné zadat název vrstvy v dialogovém okně. Po zadání názvu se přistoupí k samotnému určení osy toku. K tomuto kroku se využije vytvořených TIN vrstev, ze kterých je dobře patrné, kudy daná řeka protéká. Do jejich středu zaneseme osu toku. Pro samotné zakreslení je třeba spustit editaci, jedná se o standardní nástroj ArcGIS, tudíž nebude dále rozebírán. Zakreslení linie toku se provádí shora dolů s postupným přidáváním přítoků, je-li to potřeba. Při zanášení přítoků je třeba zajistit, aby se na žádném místě osy nekřížily, a také dbát na originalitu názvů jednotlivých úseků. Shodné názvy způsobí při exportu do HEC-RAS přenos jen jednoho úseku při ztrátě druhého stejně pojmenovaného. Výpočet by nemohl proběhnout. K identifikaci jednotlivých úseků je možno použít nástroj s názvem *River reach ID* () , který je k nalezení v hlavní liště. Po kliknutí na příslušnou část toku a otevření dialogového okna s požadavkem na pojmenování hlavního toku a přítoku se zadají

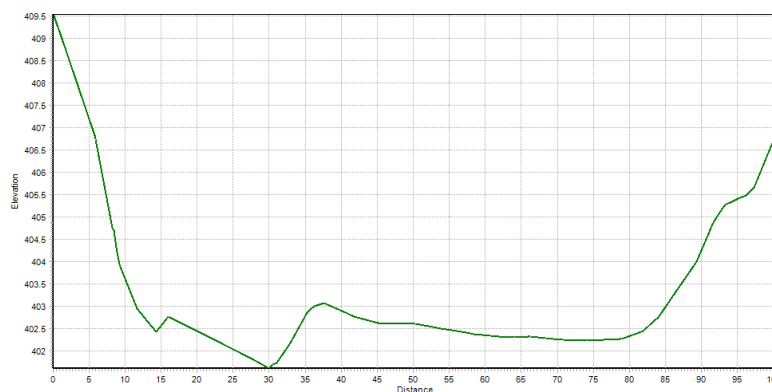
názvy. Po pojmenování jednotlivých dílčích částí toku je třeba tyto segmenty propojit a to se provede nástrojem *RAS Geometry* → *Stream Centraline Atributes* → *Topology*, čímž se uzavře topologie a v atributové tabulce se zobrazí propojení uzlových bodů patrné ve sloupcích FromNode a ToNode. Aby propojení bylo kompletní, musí se použít nástroj *RAS Geometry* → *Stream Centraline Atributes* → *Length/Station*, který slouží k výpočtu vzdálenosti jednotlivých přítoků. Vzdálenost se propočítá od spodní části toku a je zaznamenána v atributové tabulce ve sloupcích FromSta, kde je zapsána hodnota spodního koncového bodu přítoku, která v některých případech může být nulová (počáteční úsek přítoku), a ToSta.

Po zanesení os je třeba definovat břehy koryta řeky. Prostřednictvím nástrojem *RAS Geometry* → *Create RAS Layers* → *Bank Lines* je vytvořena linie břehů řeky. Po zvolení nástroje se program dotazuje na název nové vrstvy, který je třeba zadat. Pro zakreslení linií spustíme editaci. Břehové linie se na žádném místě nesmí křížit s žádnou další břehovou linií ani osou toku, musí být protínány příčnými profily a zakreslují se ve směru proudění.

Po vytvoření břehových linií následuje vyznačení os průtočné oblasti. Mezi protékané oblasti patří koryto toku a inundační území na obou březích řeky. Nástroj je k nalezení v nadstavbě *RAS Geometry* → *Create RAS Layers* → *Flow Path Centerlines*. Po spuštění se nástroj dotazuje na požadavek zkopírování osy toku jako osu protékané oblasti. Jelikož jsou tyto osy totožné, je nasnadě tuto variantu přijmout. Další dotaz se týká názvu nové vrstvy. Protékanou oblast je zapotřebí jako u břehových linií zakreslit na pravý i levý břeh. I u této vrstvy je třeba dodržet několik zásad, bez nichž by nebylo možné dále pokračovat v práci. Linie protékané oblasti je třeba zakreslit ve směru proudění, nesmí se křížit sami se sebou nebo břehovými liniemi a osou toku, všechny linie musí protínat příčné profily. Po zhotovení linií protékané oblasti je zapotřebí přiřadit atributové údaje o tom, jestli se jedná o osu protékané oblasti nebo o pravou či levou stranu. Tento krok se provede zvolením nástroje na panelu HEC-GeoRAS *Select Flowpath and Assign Line Type Atributes* (↓↓). Po aktivování nástroje je třeba pomocí kurzoru vybrat jednotlivé linie protékané oblasti a přiřadit jim příslušný atribut z rozbalovací nabídky, kde je na výběr osa totožná s osou toku, pravá strana, levá strana.

Dalším krokem v přípravě dat je definice výpočtových příčných profilů na vodním toku. Pro zakreslené příčné profily je následně stanoveno staničení a určeny údaje o výškových kótách na základě digitálního modelu reliéfu. U zadávání příčných profilů je nejpatrnější přínos přípravy dat v ArcGIS, jelikož se jeho použitím

eliminuje zdlouhavé a náročné ruční zadávání přímo v softwaru HEC-RAS. Definování příčných profilů v ArcGIS spočívá jen v zakreslování pomocí přímých nebo lomených čar. Pro tvorbu je určený nástroj *RAS Geometry* → *Create RAS Layers* → *XS Cut Lines*. Po zvolení nástroje je třeba zadat název vrstvy. Po spuštění editace je možné začít se zadáváním příčných profilů s dodržением následujících pravidel. Příčný profil musí být vždy zadáván ve směru proudění z levého břehu na pravý, musí protínat všechny linie protékané oblasti, osu toku a obě břehové linie. Linie příčného profilu by měla mít směr normály ke směru proudění (toto pravidlo je v některých případech špatně dodržitelné, ale měli bychom ho mít na paměti) a nesmí se navzájem křížit. V místech umístění mostů a propustků se volí příčný profil těsně před mostem a těsně za ním, stejně tak u hradících těles. U jezů se vždy volí před jezem, na koruně jezu a za jezem. Příčné profily se umísťují vždy při změně profilu koryta vodního toku a měl by jich být dostatečný počet, aby byla celá trasa dostatečně propočítána. Ovšem zbytečně velké množství značně prodlužuje čas na jejich zakreslení a na samotný výpočet. V neposlední řadě je třeba každému přítoku přidělit alespoň dva příčné profily, jinak by nebyl možný výpočet. Kromě ručního zakreslování je zde i možnost automatického zanesení příčného profilu o zadané délce po určitém intervalu. Lze to provést za pomoci nástroje, který se nachází na liště GeoRAS *Construct SX Cut Line* (). Po jeho zvolení je zapotřebí v dialogovém okně určit, pro jakou osu toku se budou přidělovat, a dále pak zvolit interval rozchodu a délku příčných profilů. I při těchto úkonech je třeba mít na paměti pravidla pro ruční zadávání. Po automatickém vytvoření příčných profilů je nutná vizuální kontrola a případná ruční korekce, obnášející zkrácení, prodloužení, posunutí nebo zakřivení příčného profilu. Pro přesnější propočet proudění, je vhodné do příčných profilů zanešt objekty na toku i mimo něj, pokud leží v předpokládaném záplavovém území. Zanesené příčné profily je možné si vizualizovat pomocí nástroje *Plot Cross Section* (), jak například znázorňuje obrázek 21.



Obrázek 21: Příčný profil (autor)

Pouhé zanesení však je jen začátkem práce s příčnými profily. Dále je třeba doplnit hodnoty do atributové tabulky, kterými jsou název toku a název úseku toku, staničení v ose toku a staničení břehových linií a vzdálenost jednotlivých profilů. Pro tyto úkony jsou nástroje v *RAS geometry* → *SX Cut Lines Attributes*. Pro přiřazení jména toku a úseku je to nástroj *River/Reach Name*, pro staničení *Stationing*. Tyto dva příkazy nepotřebují žádnou naši interakci. Pro staničení břehových linií je určen nástroj *Bank Stations*. Po spuštění se objeví dialogové okno, které požaduje zadání vrstvy s vytvořenými příčnými profily, zvolení vrstvy s břehovými liniemi a její zpřesnění ve smyslu, zda se jedná o liniovou nebo bodovou vrstvu. Na závěr doplňování atributů je třeba využít nástroj *Downstream Reach Length*, který vypočítá jednotlivé vzdálenosti sousedních příčných profilů směrem po směru proudění. Po doplnění atributové tabulky je potřeba vytvořit z 2D příčných profilů 3D příčné profily a to se provede nástrojem, který je umístěn na *RAS geometry* → *SX Cut Lines Attributes* → *Elevations*. Tento nástroj vytváří novou vrstvu, tudíž nejprve vyzývá k zadání jména, dalším požadavkem bude zvolení vrstvy s hotovými příčnými profily a s již hotovým digitálním modelem reliéfu ve formátu TIN. Při zpracování diplomové práci bylo použito 187 příčných profilů.

Jelikož se v blízkosti toku nachází mnoho budov (rodinné domy, chaty, budovy místní vybavenosti a další), je pro výpočet vhodné, aby byly zaznamenány a zahrnuty do výpočtu. Veškeré objekty ležící v protékané oblasti mohou velkou měrou omezovat ustálené proudění a ovlivnit samotný rozliv při vybřežení řeky z koryta. Pro zanesení překážek se zvolí nástroj *RAS geometry* → *Creat RAS Layer* → *Blocket Obstruction*, který vytvoří novou polygonovou vrstvu s názvem zadaným po aktivaci nástroje. Po spuštění editace a zvolení editovatelné vrstvy pro objekty se postupně zadávají veškeré budovy, které jsou určeny, jako potenciálně ohrožující rozliv a tok při vybřežení. Aby byly budovy zařazeny do výpočtu, je nutné, aby protínaly alespoň jeden příčný profil. K zanášení budov je vhodné použít mapový podklad, kterým může být například Ortofoto mapa nebo ZABAGED. Po dokončení zanášení budov je potřeba editované objekty přiřadit k příčným profilům, což provedeme nástrojem *RAS geometry* → *Blocked Obstructions* → *Positions*, který vytvoří atributovou tabulku s umístěním jednotlivých objektů ve vztahu k příčným profilům. I tento nástroj vyžaduje zadání názvu a nastavení provázání jednotlivých vrstev, ze kterých má vzniknout výstup. Nástroj automaticky přiřadí ke každému objektu výšku, která se dá změnit ve sloupci *UserElev*.

V nadstavbě GeoRAS lze zadat umístění mostů a propustků. Nelze zadat celou geometrii, ale pouze umístění objektu na toku s uvedením jménem objektu,

staničení a vzdálenosti od nejbližšího příčného profilu proti směru proudu. Pro vytvoření vrstvy se využije nástroj *RAS Geometry* → *Create RAS Layer* → *Bridges/Culverts*. Po zvolení se zadá název vrstvy a za využití vhodného mapového podkladu, kterým je Ortofoto mapa nebo ZABAGED, se editují mosty a propustky. Požadavky na zakreslení jsou obdobné jako u příčných profilů, tedy musí protínat osu toku, břehové linie a protékanou oblast, jinak nebudou propočteny a exportovány. Po zakreslení je třeba doplnit atributy nástrojem *RAS Geometry* → *Bridges/Culverts* → *River/Reach Names*, jímž se přidělí jméno toku, na kterém se most nachází, a nástrojem *RAS Geometry* → *Bridges/Culverts* → *Stationing*, kterým se přiřadí staničení. Tyto dva úkony doplnění atributů se provedou automaticky. Další tři atributy se musí doplnit ručně. Jedná se o název (Node Name) a vzdálenost objektu od nejbližšího příčného profilu proti směru proudění (US Distance) a šířka mostu (Top Widh). Stejně jako u příčných profilů je třeba převést vrstvu do 3D pomocí nástroje *RAS Geometry* → *Bridges/Culverts* → *Elevations*. Po jeho zvolení se objeví dotaz na jméno vznikající vrstvy, na vrstvu, ze které má k převodu dojít, a na výškopisný model použitý k vytvoření.

Dalším editovatelným prvkem je způsob využití půdy. Jedná se o rozdělení a určení jednotlivých lokalit v zájmovém území kolem toku a přiřazení součinitele drsnosti na základě způsobu využívání pozemku. Pro provedení zvolíme nástroj *RAS geometry* → *Create RAS Layer* → *Land Use Area*, který vytvoří polygonovou vrstvu. K editování je vhodné použít mapový podklad, v tomto případě nejvíce vyhovuje ZABAGED. Prvním krokem editace je označení území, v němž budou zadány drsnostní součinitele. Mělo by se jednat o plochu kolem toku, která bude obsahovat veškeré příčné profily a dříve vytvořené vrstvy, čímž vznikne jeden velký polygon. Pro rozčlenění území se využije nástroj z editoru *Cut Polygon* (✚). Po rozdělení je nutné dobře uvážit, jaké budou zadány drsnostní součinitele. Nejlepším postupem vedoucím k určení je terénní průzkum následovaný stanovením drsností z empirických tabulek drsností. Pro účely modelování simulace povodňových průtoků na řece Želivka byly při terénním průzkumu určeny drsnostní součinitele podle Manninga. Zobrazeny jsou v tabulce 2.

Při zadávání jednotlivých drsností do sloupce N-Valeu je současně nutno zadávat i názvy ploch odpovídající dané drsnosti do sloupce LUCODE. Je velmi důležité, aby jeden typ využívané plochy měl vždy zadaný stejný drsnostní součinitel. V opačném případě není možná další manipulace s touto vrstvou a není dále možné vytvořit dvě atributové tabulky nástrojem *RAS Geometry* → *Manning's Values* → *Create LU* → *Manning Table* a nástrojem *RAS Geometry* → *Create RAS Layer* →

Extract N Valeus. Nejdříve se vytvoří atributová tabulka LU Manning, která vychází z atributové tabulky využívání půd. Pro její vytvoření je třeba zadat sloupec atributové tabulky využití půd, ze kterého se budoucí atributová tabulka rozdělí. Rozdělení je vhodné provést podle názvu jednotlivých pozemků. Tím vznikne přehledná atributová tabulka, ve které jsou zaneseny názvy pozemků, drsnosti, které jim odpovídají, a počet rajónů s určitým názvem. Druhý nástroj zmíněný výše přiřadí drsnostní součinitele ke každému příčnému profilu. Po spuštění nástroje se do dialogového okna vkládá instrukce určující, zda budou drsnostní součinitele zadány z vrstvy LU Manning nebo z vrstvy Land Use ze sloupce N_Value. Následuje zadání vrstvy s příčnými profily a nakonec názvu nově vzniklé vrstvy. Ze vzniklé atributové tabulky je patrné, že jednomu příčnému profilu může náležet více než jedna drsnost, což je způsobeno několika druhy využívané půdy v profilu.

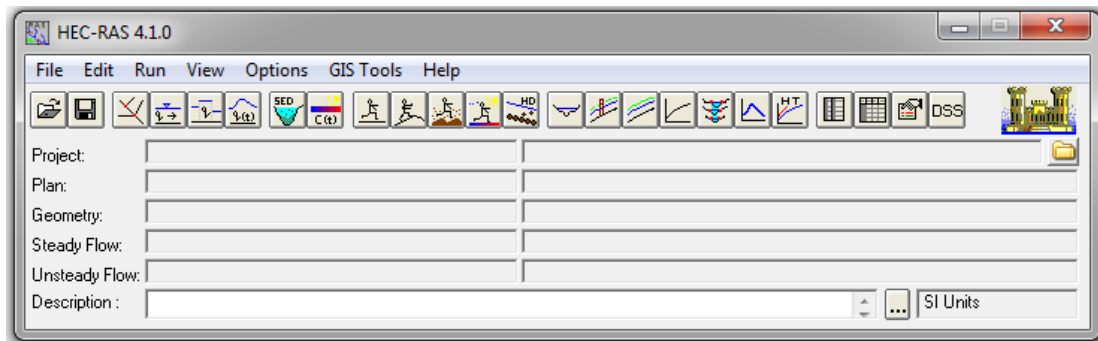
Popis dosud zmíněných kroků lze chápat jako základní vstupy pro export dat z prostředí ArcGIS do HEC-RAS. Samozřejmě je možno editovat daleko více parametrů, ale protože tato práce si neklade za cíl podrobně popisovat jednotlivé funkce GeoRAS, tudíž tyto parametry pro modelování povodňových průtoků na řece Želivka postačí.

Posledním krokem při přípravě dat je jejich export. Nejprve je vybrán nástroj *RAS Geometry* → *LayerSetup* pro vložení vrstev do exportu. Zobrazí se dialogové okno se čtyřmi záložkami. V první záložce se definuje model terénu, v druhé se zadá hlavní tok s příčnými profily a to ve 2D i ve 3D zobrazení, ve třetí záložce se zadají vrstvy, které budou vstupovat do exportu, a ve čtvrté záložce se zadají atributové tabulky. Před každým exportem je velmi důležité se přesvědčit, že jsou všechny vrstvy zvoleny a umístěny na správném místě. Po ověření lze přistoupit k samotnému exportu dat pomocí nástroje *RAS Geometry* → *Export RAS data*. Zobrazí se okno s možností nastavení cesty pro uložení výstupu. Po spuštění exportu, jehož časová délka je závislá na velikosti modelovaného území a počtu vstupních vrstev, se na dialogovém okně objevují proběhlé operace. Konec exportování dat je oznámen hláškou *GIS data from RAS exported successfully*.

7.2.2 Hydraulická analýza HEC-RAS

V softwaru HEC-RAS probíhá samotné propočítání průtokové vlny. Bylo by možné v něm realizovat celou definici toku, která byla provedena v GeoRAS. Program je plně soběstačný, ale manuální zadávání vstupů do simulace v HEC-RAS je velmi zdlouhavé. Pro potřeby modelování povodňových průtoků na vodním toku Želivka bylo využito ustáleného proudění s vytvořením 1D modelu.




Po úspěšném exportu z GeoRAS se spustí HEC-RAS na obrázku 22 a založí se nový projekt. Založení se provede pomocí *File* → *New Project...* Po spuštění je vznesen dotaz na jméno a umístění. Výhodné před další prací je přenastavení americké délkové jednotky na mezinárodní metrický systém (US Cutomary/SI), které se provede *Options* → *Unit systém*.







Obrázek 22: HEC-RAS (autor)


Pro import dat z GeoRAS se otevře editační prostředí nástrojem *Edit/Enter geometric data* (☒). Po otevření editačního okna se pro import zvolí *File* → *Import Feometric Data* → *GIS Format*. V dialogovém okně se zvolí soubor, který je určen pro import. Po potvrzení importovaného souboru je dalším oknem vznesen dotaz na jednotky, opět je na snadě nastavit metrický systém a potvrdit import *Finished – Import Data*. Zbylé záložky v dialogovém okně jsou na definování importovaných linií a poslední záložka je na definování importovaných příčných profilů. Úspěšný import je patrný zobrazením schématu toku v editačním okně.






Prvním krokem při editaci importovaného toku je zahlobení a tím vytvoření koryta toku. Koryto v GIS nebylo vytvořeno, jelikož bylo pracováno s digitálním modelem reliéfu 5. generace, který je založen na metodě odrazu infračerveného paprsku od terénu. Vodní hladina tento paprsek ovšem pohltí a není odražen od koryta toku, a tudíž není v modelu koryto zahrnuto a je třeba ho zahlobit. Kdyby se tento krok neprovedl, zanesla by se do výsledného modelu značná chyba a to převážně u hlubších koryt s malými průtoky, jako jsou například Q_1 , Q_2 a Q_5 . Editace koryt toku v příčných profilech je poměrně zdoluhavá práce. V této práci byla koryta zadávána z geodetických zaměření. Pro zadávání příčných profilů slouží nástroj *Edit and/or create cross section* (☒). Po zvolení nástroje se objeví příčný profil s jednotlivými lomovými body, které jsou zaneseny v tabulce *Cross Section Coordinates*. Tabulka je složena ze sloupce staničení lomových bodů příčného profilu, jejich nadmořské výšky a drsností. V principu je tabulka shodná například se softwarem Microsoft Office Excel. Jelikož se jedná o zjednodušenou verzi, je

výhodnější vždy tabulku příčného profilu překopírovat do zmíněného „Excelu“ a až v tomto prostředí manuálně doplnit koryto toku na své patřičné místo o geodeticky změřených rozměrech. Jelikož se v tabulce nachází i sloupec s hodnotami Manningova drsnostního součinitele n , nabízí se konečné doupravení a zpřesnění drsností koryta. Drsnosti se nezadávají ke každému bodu v intervalech. Zadájí se u lomových bodů, u kterých se má drsnost změnit. V nevyplněných políčkách se automaticky uvažuje drsnost zadána výše v tabulce, dokud není změněna na začátku dalšího intervalu. Po doplnění koryta a drsností je třeba určit břehové body. Ty se zadávají v grafické editaci příčných profilů *Jump to the Graphical Cross Section Editor* (). Tento nástroj byl využit jen pro editaci zmíněných břehových linií pomocí nástroje *Set the Bank Stations* (). Zanesení proběhlo pouze jednoduchým kliknutím na vrchol levého a pravého břehu koryta. Tyto body slouží k určení přetečení vody do inundace. Dokud jich voda nedosáhne, nebude puštěna do možných lokálních prohlubní v inundaci, které mohou mít nižší nadmořskou výšku než vrchol levého a pravého břehu. Po zadání břehů následuje návrat do předchozího dialogového okna, které se provede tlačítkem *Jump to the General/Tabulator XC Editor* (). Po návratu se postoupí na další příčný profil, kliknutím na šipku v dialogovém okně a celý proces se opakuje.

Dalším krokem je vytvoření mostů a propustků. Jelikož se v zájmovém území žádný propustek nevyskytuje, nebude tento krok popsán. Pro tvorbu mostu je důležité, aby u každého mostu byly v těsné blízkosti dva příčné profily a to jeden před mostem a druhý za mostem. Při dodržení tohoto pravidla se může přistoupit k editaci mostní konstrukce za využití nástroje *Edit and/or create bridges and culverts* (). Po aktivování nástroje se otevře dialogové okno, ve kterém se stanoví, mezi jakými příčnými profily se most nachází. Určení mostu se provede pomocí *Options* → *Add Bridges and/or Culverts...* Objeví se dotaz na zadání staničení mostu. V této práci byly mosty určeny v GeoRAS, tudíž tento krok odpadá. Po stanovení polohy mostu se v dialogovém okně zobrazí dva příčné profily, mezi kterými se most nachází. Přepínání mezi jednotlivými mosty je opět možné pomocí šipek v okně. Pro vytvoření geometrie mostu se nejdříve definuje mostovka a poté pilíře, případně šikmé stěny mostu. Mostovka se definuje pomocí nástroje *Edit the bridge deck/roadway* (). Objeví se dialogové okno, do kterého se zadá vzdálenost mezi horním příčným profilem a horním okrajem objektu (*Distance*), šířka objektu (*Width*) a hodnota součinitele přepadu (*Weir Coef*). Geometrie objektu se zadává do tabulky se dvěma oddíly. *Upstream* je oddíl pro definici mostu na horním příčném profilu a *Downstream*


je oddíl pro definici mostu na dolním příčném profilu. Zadávání se provádí dle staničení ve sloupci *Station* a definováním nadmořských výšek mostní konstrukce ve sloupcích *High chord* pro celkovou výšku mostu a *Low cord* pro světlou výšku mostu. Jestliže je most na spodním a horním příčném profilu stejný, není třeba do sekce *Downstream* parametry zanášet ručně, ale lze je překopírovat pomocí tlačítka *Copy US to DS*. V opačném případě je třeba ruční editace. Po zaznamenání a potvrzení veškerých parametrů mostovky se přistoupí k tvorbě pilířů. To se provede nástrojem *Edit the piers for this bridge* (). Pilíře se přidávají jednotlivě opět na horní i dolní příčný profil (*Upstream, Downstream*). Jsou vytvořeny mezi dnem (povrchem příčného profilu) a spodním okrajem mostovky. Přidání dalšího pilíře se provede tlačítkem *Add* v horní části dialogového okna. Nejprve se určí staničení osy pilíře v okně *Centraline Station Upstream* a *Centraline Station Downstream*. V tabulce ve sloupcích *Pier Width* se zadá šířkový rozměr pilíře a do sloupce *Elevation* nadmořská výška, do jaké bude zadaná šířka realizována. Pro zadávání šikmých zdí slouží nástroj *Edit the sloping abutment for this bridge* (). Editace šikmých zdí probíhá obdobně jako u vytváření mostovky. Po zanesení veškeré geometrie se definuje způsob výpočtu proudění most a případné proudění přes most. U určení se použije *Edit the modeling approach for the bridge*. K výpočtu lze vybrat jeden ze čtyř možných přístupů proudění mostem: v oddílu *Low Flow Method* to je energetická rovnice (*Energy*), momentová rovnice (*Moment*), Yarnellova rovnice (*Yarnell*) nebo metoda WSPRO. V této diplomové práci byla využita energetická rovnice. Pro proudění přes mostovou konstrukci je možno využít energetickou rovnici (*Energy only*) nebo výpočet přepadu přes jez (*Pressure and/or Weir*) umístěné v oddílu *High Flow Method*. Pro potřeby simulování povodňových průtoků na vodním toce Želivka byla využita metoda energetické rovnice.

Po zanesení mostních konstrukcí, dříve než se přistoupí k samotnému exportu, je třeba zadat okrajové podmínky. Definování okrajových podmínek je klíčové pro výpočet a závisí na volbě režimu výpočtu. Pro modelování povodňových průtoků na vodním toku Želivka byl zvolen ustálený režim proudění. Při ustáleném proudění se na uzávěrový profil na začátku a konci modelovaného úseku volí jedna hodnota a to průtok nebo vodní stav. Tyto okrajové podmínky se zadají ve výchozím okně HEC-RAS zaznamenané na obrázku 22 pomocí nástroje *Edit/Enter steady flow data* (). V této diplomové práci bylo pro modelování na vodním toku Želivka zvoleny průtoky zanesené v tabulce 4. V základním dialogovém okně okrajových podmínek se nejprve zadá počet simulací *Enter/Edit Number of Profiles*. Počet simulací byl zvolen dle počtu N-letostí v tabulce 4. Jestliže je k dispozici v zájmovém území více

příčných profilů s rozličnými průtoky, přidají se příčné profily pomocí *Add Multiple...* To slouží k navolení více profilů najednou. Alternativou je rozbalit lištu *River Sta.:* a narolovat na požadovaný příčný profil a potvrdit tlačítkem *Add A Flow Change Location*. Rolery *River* a *Reach* slouží k volbě jednotlivých úseků a přítoků modelovaného toku. Po zadání požadovaných simulací a příčných profilů se zapíše do volných polí tabulky hodnoty průtoků, kde hodnota PF je brána vzestupně od nižší doby opakování. Po zadání všech potřebných parametrů se navolí dolní okrajová podmínka nacházející se na tlačítku *Reach Boundary Conditions...* Po otevření okna lze zvolit několik okrajových podmínek pro každý profil v různých místech se zaškrtnutým příkazem *Set boundary for all profiles*. Je možné vybrat ze čtyř okrajových podmínek. Je to známá úroveň hladiny v dolním příčném profilu pro každý řešený průtok (*Known W.S.*), kritická hloubka v dolním profilu (*Critical Depth*), zadání sklonu hladiny vypočtené na základě měrné křivky profilu (*Normal Depth*), konsumpční křivka (*Rating Curve*). Při modelování byla zvolena *Critical Depth*. U této okrajové podmínky se nemusí dále nic doplňovat. HEC-RAS automaticky propočítá kritickou hloubku pro každý profil. U ostatních okrajových podmínek je vyžadováno ve vyskakujícím dialogovém okně zadat odpovídající hodnotu okrajové podmínky. Pro každý zvolený profil se okrajová podmínka volí zvlášť. V tabulce na zadávání jsou důležité dva sloupce: sloupec *Upstream*, který slouží pro zadání okrajových podmínek, jde-li o bystřinné proudění a sloupec *Downstream*, jde-li o proudění říční (použito v této práci). Po zadání se vše potvrdí a v dialogovém okně *Steady Flow Data* se okrajové podmínky potvrdí stisknutím tlačítka *Apply Data*. Nyní lze přistoupit k samotnému výpočtu, který se provede v základním dialogovém okně HEC-RAS nástrojem *Perform a steady flow simulation* (). V dialogovém okně se zvolí režim proudění, ve kterém proběhne simulaci *Flow Regime*. V této nabídce je možné zvolit říční proudění (*Subcritical*), bystřinné proudění (*Supercritical*) nebo kombinaci bystřinného a říčního (*Mixed*). Pro modelování povodňových průtoků na vodním toku Želivka bylo zvoleno říční proudění a přistoupilo se k samotnému propočtu *Compute*. Průběh propočtu je zobrazován v *Computing subcritical profile*. Ukončení výpočtu je oznámeno hláškou *Complete Process* se zobrazením času propočtu. Výsledek výpočtů je možné si prohlédnout v hlavním dialogovém okně HEC-RAS. Lze zobrazit jednotlivé příčné profily *View cross section* () , podélný profil *View profiles* () , konsumpční křivka *View computed rating curves* () a 3D situaci všech příčných profilů *View 3D multiple cross section plot* () .

7.2.3 Modelování záplavových území GeoRAS

Před modelováním záplavových území v GeoRAS se exportují data z HEC-RAS. V hlavním dialogovém okně HEC-RAS se zvolí *File* → *Export to GIS Data*. Objeví se dialogové okno s možností zadání cesty a názvu exportovaného souboru (*Export File*). Lze zvolit jednotlivé úseky toku a přítoky, které mají vstoupit do exportu (*Select Reaches to Export*). Další důležitou volbou je nastavení vstupních parametrů průtoků (*Select Profiles to Export*). Export nabízí více možností zadání parametrů, ty ale při modelování povodňových průtoků na vodním toku Želivka nebyly využity. Po zadání potřebných kritérií pro export stačí stisknout *Export Data* a vyčkat na zpracování a potvrzení správně proběhlého exportu.

Následujícím krokem je import dat do GeoRAS. Jelikož exportovaná data z HEC-RAS jsou ve formátu SDF, se kterými neumí GeoRAS zacházet, je nezbytné data převést do formátu XML. Převod se provede nástrojem *Import RAS SDF File* (). V dialogovém okně se jen vyberou exportovaná data a potvrdí se konverze.

Po převedení dat je možno přistoupit k samotnému importu. Nastavení se provede příkazem *RAS Mapping* → *Layer Setup*. Otevřené dialogové okno slouží k zadání názvu analýzy (*New Analysis*), cesty k importovaným datům (*RAS GIS Export File*), modelu terénu (*Terrain*) a s ním spojený formátem (TIN, GRID) a cesty k němu. Následuje zadání cesty výstupu (*Output Directory*) a velikostí rastrových buněk (*Rasterization Cell Size*), který byly nastaveny na 0.1 m. Po potvrzení nastavení se vytvoří nová datová vrstva, ve které bude zvolený digitální model terénu. Následuje samotný export dat pomocí nástroje *RAS Mapping* → *Import RAS Data*. Dialogové okno se pouze potvrdí tlačítkem *OK*. Import dat je ukončen a potvrzen hláškou *RAS data imported to GIS successfully*. Veškerá data jsou naimportována do ArcGIS a může se přistoupit k samotné vizualizaci záplavových území. Naimportovaná data jsou geometrie vodního toku.

Samotné modelování záplavových území se sestává ze dvou kroků. Prvním krokem se vytvoří z příčných profilů TIN vrstva s výškami hladin v toku. Vznikne za použití nástroje *RAS Mapping* → *Inundation Mapping* → *Water Surface Generation*. Druhým finálním krokem je nástroj *RAS Mapping* → *Inundation Mapping* → *Floodplain Delineation Using Raster*. Tento nástroj vytvoří záplavové území ve dvou vrstvách: v prosté polygonové vrstvě a v rastrové vrstvě s hloubkami vody.

Po vytvoření záplavových území se může přistoupit k tvorbě výstupů například v podobě map. Mapy se tvoří v *Layout*. To je standardní nástroj ArcGIS, tudíž nebude dále popisován.

8 VÝSLEDKY

Po sestavení a úspěšném spuštění modelu se přistoupilo k tvorbě mapových výstupů, které jsou součástí přílohy. Celkovou situaci na zvoleném zájmovém území znázorňují přílohy: Želivka příčné profily, Želivka záplavové území, které vymezuje rozlivy pro jednotlivé povodňové průtoky, a Želivka záplavové území (Q₁₀) až (Q₁₀₀), které reprezentuje vodní stavy jednotlivých povodňových průtoků, obsažené v kapitole 13 Přílohy. Do podrobnějších výstupů byly zahrnuty jen zastavěné lokality s potencionálním ohrožením povodní. Jedná se o obec Želiv ležící na 52,5 až 54,5 ř. km a dvě chatové oblasti nacházející se na 56,75 až 58,25 ř. km a 58,25 až 61 ř. km. Ve zbylých částech toku, které jsou obklopeny lesy a loukami, je zástavba velmi rozptýlena nebo zcela chybí. K zatopení a ohrožení významnějších budov by nedošlo, tudíž zobrazení těchto oblastí nebude uváděno v přílohách. Při tvorbě modelu byly použity N-leté průtoky Q₁, Q₂, Q₅, Q₁₀, Q₂₀, Q₅₀, Q₁₀₀. Z výstupů simulace je patrné, že u průtoků Q₁ a Q₂ došlo k vyběžení jen na několika málo místech, přičemž se nejedná o nebezpečné průtočné množství, nebyly zatopeny žádné objekty a nedošlo k přetečení žádného mostu ani lávky. U průtoků Q₅ došlo, jako u předchozích dvou, k vyběžení jen na několika místech. Bylo mírně zatopeno několik objektů v chatové oblasti a v obci Želiv několik objektů s malou významností, například garáže, kůlny a nedošlo k přetečení žádného mostu ani lávky. Tyto tři průtoky tudíž nebudou uvedeny v přílohách.

Při povodňovém průtoku Q₁₀ bylo zatopeno celkově padesát objektů po celé délce zkoumaného vodního toku Želivka. V obci Želiv to bylo patnáct objektů smíšené významnosti. Znázornění přináší příloha: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q₁₀). V chatových oblastech bylo zaplaveno třicet objektů, mezi které patří chaty, garáže a kůlny zanesené v přílohách: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q₁₀) a Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q₁₀). Zbylých pět objektů bylo zasaženo na nezmapovaném území a jedná se o nepoužívané objekty a jednu garáž. U silničního mostu na silnici č. 130 mezi Miletínem a Senožaty na obrázku 11 na 43,415 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 3,955 m. U silničního mostu na silnici č. 129 mezi obcemi Křelovice a Želiv na obrázku 13 na 52,468 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 3,41 m. Most v obci Želiv vedoucí z hlavní silnice ke klášteru na obrázku 14 na 53,053 ř. km nebyl přetečen. Voda byla pod mostovkou 2,345 m. U silničního mostu v obci Želiv vedoucího z hlavní silnice směrem na obec Sedlice na obrázku 15 na 54,017 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 1,73 m. U posledního

mostu nacházejícího se u vodní elektrárny Sedlice na obrázku 16 na 57,49 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 1,13 m. U lávky v obci Poříčí na obrázku 17 na 50,950 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod lávkou 1,62 m. U lávky v obci Želiv na obrázku 18 na 54,325 ř. km nedošlo k přetečení, ale voda byla těsně pod lávkou.

Při povodňovém průtoku Q_{20} bylo zatopeno celkově devadesát tři objektů po celé délce zkoumaného vodního toku Želivka. V obci Želiv bylo zasaženo dvacet osm objektů smíšené významnosti znázorněných v příloze: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q_{20}). V chatových oblastech bylo zasaženo padesát sedm objektů a jako v předchozím případě se jedná o chaty a jejich přidružené budovy, které jsou zaneseny v přílohách: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q_{20}) a Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q_{20}). Zbylé objekty kolem úseků nezanesené do příloh jsou totožné s předchozí situací. U silničního mostu na silnici č. 130 mezi Miletínem a Senožaty na obrázku 11 na 43,415 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 3,555 m. U silničního mostu na silnici č. 129 mezi obcemi Křelovice a Želiv na obrázku 12 na 52,468 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 3,17 m. Most v obci Želiv vedoucí z hlavní silnice ke klášteru na obrázku 14 na 53,053 ř. km nebyl přetečen. Voda byla pod mostovkou 2,215 m. U silničního mostu v obci Želiv vedoucího z hlavní silnice směrem na obec Sedlice na obrázku 15 na 54,017 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 1,58 m. U posledního mostu nacházejícího se u vodní elektrárny Sedlice na obrázku 16 na 57,49 ř. km nedošlo k přetečení. Voda pod mostovkou byla 0,96 m. U lávky v obci Poříčí na obrázku 17 na 50,950 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod lávkou 1,42 m. U lávky v obci Želiv na obrázku 18 na 54,325 ř. km došlo k přetečení. Voda přetékala přes lávku s výškou 0,08 m.

Při povodňovém průtoku Q_{50} bylo zasaženo celkově sto třináct objektů po celé délce zkoumaného vodního toku Želivka. V obci Želiv bylo zasaženo třicet sedm objektů smíšené významnosti znázorněných v příloze: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q_{50}). V chatové oblasti to bylo šedesát devět objektů. Jedná se o chaty a jejich přidružené budovy, které jsou znázorněny v příloze: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q_{50}) a Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q_{50}). Zbylých sedm objektů bylo zasaženo podél úseku toku a nejsou zanesené do příloh. Jde o nepoužívané objekty, jednu garáž a jednu kůlnu. U silničního mostu na silnici č. 130 mezi Miletínem a Senožaty na obrázku 11 na 43,415 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 3,165 m. U silničního mostu na silnici č. 129 mezi obcemi Křelovice a Želiv na obrázku 12 na 52,468 ř. km

nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 2,9 m a protékala i pravým inundačním polem. Most v obci Želiv vedoucí z hlavní silnice ke klášteru na obrázku 14 na 53,053 ř. km nebyl přetečen. Voda byla pod mostovkou 2,095 m. U silničního mostu v obci Želiv vedoucího z hlavní silnice směrem na obec Sedlice na obrázku 15 na 54,017 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 1,38 m. U posledního mostu nacházejícího se u vodní elektrárny Sedlice na obrázku 16 na 57,49 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 0,77 m. U lávky v obci Poříčí na obrázku 17 na 50,950 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod lávkou 1,2 m. U lávky v obci Želiv na obrázku 18 na 54,325 ř. km došlo k přetečení. Voda přetékala přes lávku s výškou 0,33 m.

Nejvíce zasažených objektů v zájmovém území bylo při povodňovém průtoku Q_{100} . Bylo jich sto dvacet osm. V obci Želiv šlo o čtyřicet budov smíšené významnosti. Jsou znázorněny v příloze: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q_{100}). V chatových oblastech bylo zatopeno celkem osmdesát objektů znázorněných v přílohách: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q_{100}) a Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q_{100}). Jedná se opět o chaty s přidruženými budovami. Zbýlých osm objektů bylo zasaženo podél úseku toku a nejsou zanesené do příloh. Jedná se o nepoužívané objekty, dvě garáže a jednu kůlnu. U silničního mostu na silnici č. 130 mezi Miletínem a Senožaty na obrázku 11 na 43,415 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 2,885 m. U silničního mostu na silnici č. 129 mezi obcemi Křelovice a Želiv na obrázku 12 na 52,468 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 2,76 m a protékala i oběma inundačními poli. Most v obci Želiv vedoucí z hlavní silnice ke klášteru na obrázku 14 na 53,053 ř. km nebyl přetečen. Voda byla pod mostovkou 1,815 m. U silničního mostu v obci Želiv vedoucího z hlavní silnice směrem na obec Sedlice na obrázku 15 na 54,017 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod mostovkou 1,24 m. U posledního mostu nacházejícího se u vodní elektrárny Sedlice na obrázku 16 na 57,49 ř. km nedošlo k přetečení. Voda pod mostovkou byla 0,65 m. U lávky v obci Poříčí na obrázku 17 na 50,950 ř. km nedošlo k přetečení. Voda byla pod lávkou 1,02 m. U lávky v obci Želiv na obrázku 18 na 54,325 ř. km došlo k přetečení. Voda přetékala přes lávku s výškou 0,51 m.

9 DISKUZE

Nacházíme se v období hydrologických extrémů. Jedním extrémem jsou abnormální sucha a druhým velké povodně. Povodně a s tím spojená protipovodňová opatření jsou v dnešní době velmi významná témata. Na území České republiky je hrozbou mnoho druhů povodní, které se však dají s celkem uspokojivou přesností simulovat. Tyto modely se dále využívají k návrhům a tvorbě protipovodňových opatření. Realizovat tyto postupy umožňuje hydroinformatika.

Při vytváření hydraulického modelu pro povodí Želivky jsem se setkal s několika úskalími, která bylo třeba řešit. První vyvstalo již při instalaci programu HEC-RAS. Jelikož se jedná o americký software, musel být přenastaven formát zobrazení a jazyka tak, že jazyk český byl změněn na anglický (Spojené státy). Důvodem je používání desetinné tečky na místo české desetinné čárky. Volbou požadovaného jazyka nebylo dosaženo bezproblémového chodu. U exportu i importu dat vznikaly nepochopitelné chyby, které se nedaly odstranit pouhým přenastavením desetinného oddělovače. Občas vadila i dlouhá cesta do výchozí nebo cílové složky nebo program vyžadoval umístění zdrojové či cílové složky na systémovém oddílu disku. Po akceptování těchto, dle mého názoru, nedostatků ve zdrojovém kódu se mohlo přistoupit k vytváření modelu. Práce v ArcGIS s nadstavbou GeoRAS byla uživatelsky přívětivá a intuitivní. Export dat byl však provázen komplikacemi. Protože americký software neakceptuje diakritiku, bylo nutné ji z veškerých atributových tabulek odstranit, provést znova veškeré výpočty geometrie a exportovat data. S dalším problémem se počítalo již před vytvářením modelu. Souvisí s Digitálním modelem reliéfu 5. generace, konkrétně s metodou, kterou je pořizován digitální model terénu. Jelikož je získáván pomocí laserové letecké metody infračerveným laserem, který je pohlcen vodní hladinou, není zaznamenáno koryto, ale hladina ve vodním toku. Tento nedostatek bylo možné odstranit až v HEC-RAS pomocí ručního zahloubení koryta v editaci příčných profilů. To byla velice zdoluhavá a nepříjemná činnost. Zahlubování probíhalo na základě dat z geodetického zaměření příčných profilů, což vyžadovalo zkombinovat dva různé modely terénu. Další práce byla vcelku poklidná a bez komplikací. Poslední zjevný nedostatek souvisí s použitím 1D modelu, který nezvládá větší meandry a inundační území. Kvůli této vlastnosti nebyl model na některých místech schopen dopočítat rozliv. Jelikož se v těchto místech nenachází žádná potenciálně kritická oblast, dal se tento nedostatek přehlédnout, aniž to mělo negativní dopady na zpracované téma. S neschopností HEC-RAS dopočítat záplavová území ve složitých meandrech a rozlehlých inundačních území

souvisí s vložením do ArcGIS, kde se pro získání finálních záplavových čar udělají rozdíly rastrů a to s již zmíněným Digitálním modelem reliéfu 5. generace. Jelikož je digitální model terénu získáván metodou, při které je zaznamenán obraz hladiny ve vodním toku, je výsledná naskenovaná hladina vždy odrazem určitého průtoku. V důsledku byla na některých místech simulovaná hladina pod naskenovanou hladinou obzvláště při malých průtocích Q_1 , Q_2 . Přes výše uvedené nedostatky a zaznamenané problémy hodnotím software pozitivně a shledávám ho za silný nástroj pro modelování povodňových průtoků a záplavových čar.

Z mapových podkladů vytvořených z výsledků modelu povodňových průtoků na vodním toce Želivka jsou patrné objekty ohrožené při jednotlivých průtocích. Jejich ohrožení volá po navržení a vytvoření protipovodňového opatření. U chatových oblastí s tím bude nejspíš velký problém, který nespočívá ani tak v realizaci, jako v ekonomičnosti opatření. Jelikož se jedná o malé rekreační objekty, nejspíše se nevyplatí ochraňovat je před povodní. Snad jediný přístup, který se nabízí, je dostatečná transformace povodňové vlny vodní nádrží Sedlice, k jejíž realizaci je nezbytné disponovat dostatečně velkým retenčním prostorem v nádrži. Ten ovšem nelze zajistit celoročně, jelikož vodní nádrž slouží jako zásobárna vody pro vodní elektrárnu Sedlice. Dostatečného zvětšení retenčního prostoru nádrže by bylo dosaženo jen prostřednictvím včasného hlášení o přicházející povodni, v jehož důsledku by byl včas snížen vodní stav před povodňovou událostí. Pro jednoznačný a přesný závěr by se musela vytvořit podrobná studie a návrh opatření. Dalším ohroženým místem na toku je obec Želiv. Ze záplavových čar je patrné, že může být povodní zasaženo relativně velké množství budov. Jedná se o intravilán obce, tudíž by se již dalo uvažovat o vybudování protipovodňového opatření. Jako první opatření se nabízí transformace povodňové vlny vodní nádrží Sedlice, obdobně jako bylo navrženo výše pro zajištění ochrany chatových oblastí, a transformace vodní nádrží Vřesník. Jedná se o významný přístup, který by nejspíš nezadržel průtoky Q_{100} . Další protipovodňové opatření spočívá ve vytvoření suchého poldru v inundaci před obcí nebo ve vystavění ochranných hrází přímo v obci. Tyto a mnoho dalších možností protipovodňových opatření by před realizací bylo třeba navrhnout a prověřit modelem. Oblasti ležící pod obcí Želiv nejsou výrazně ohroženy povodní až na několik méně významných staveb, které se před zatopením dají chránit lokálně a na vlastní náklady majitelů například pytli s pískem, dostatečně vysokou podezdívkou pod plotem nebo lokálními přenosnými hradicími prvky.

V současné době nejsou na zvoleném úseku vodního toku Želivka vybudována žádná protipovodňová opatření s výjimkou čistírny odpadních vod ležící

pod obcí Želiv, která je lokálně obehnána zemní sypanou hrází. Tento stav protipovodňových opatření není dostatečný. Je jen otázkou času, kdy budou reálně potřebná k odvrácení nežádoucích povodní. Proto doporučuji vypracovat návrh protipovodňových opatření a začít s jeho realizací ještě před příchodem první destruktivní povodně, která se obci Želiv a chatovým oblastem výše po proudu dosud vyhýbala.

V České republice se většina protipovodňových opatření buduje až po průchodu ničivé povodně. To je dle mého názoru velká chyba, protože včasná výstavba protipovodňového opatření by zamezila škodám na majetku a na lidských životech a tím by byla ve finálním nákladu levnější než v případě jejího budování až po fatální povodni. Příkladem je obec Višňová ležící na řece Smědě ve Frýdlantském výběžku Libereckého kraje, kterou, jak uvádí Ing. Olgerd Pukl v článku Protipovodňová opatření při řece Smědá v okolí obce Višňová, prošla devastující blesková povodeň v srpnu roku 2010. Do této osudové povodně byla obec i několikrát do roka postižena malými povodněmi bez souvisejících škod. Průměrný roční průtok v obci Višňová činí $3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ale během této povodňové události, která strhávala i silniční mosty, dosáhl kulminační průtok $300 - 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Škody na obecním majetku byly vyčísleny na 30 mil. Kč, škody na osobním majetku a psychice obyvatel byly nevyčíslitelné. Prvotní náklady na záchranné a likvidační práce dosáhly 7 mil. Kč. Po této povodni byla vybudována protipovodňová opatření s celkovým nákladem 15,8 mil. Kč. To dokazuje obrovský rozdíl v nákladech na výstavbu protipovodňových opatření a v krytí škod na majetku, při čemž se tato povodeň obešla bez ztrát na životech. Tento odstrašujícím případ dokazuje, proč musí být protipovodňová opatření budována včas.

10 ZÁVEŘ

Diplomové práce poskytuje rešeršní sepsání problematiky povodní, jejich predikcí, protipovodňových opatření a řešení výjimečných situací při odstraňování povodňových škod. Cílem je nabídnout podklady umožňující základní pochopení skutečností spojených s povodněmi a protipovodňovými opatřeními.

Následující detailní popis celého povodí Želivky zahrnující část mezi 41,6182 a 63,8893 ř. km odhaluje parametry zájmového území a objektů se zde nacházejících. Pro tento úsek byl sestaven hydraulický model s namodelováním povodňových průtoků včetně následného vytvoření grafických výstupů záplavových čar. Proces celého modelování je zachycen v podrobném postupu v kapitole 7 Metodika. Simulace byla provedena s využitím softwaru ArcGIS s nástavbou GeoRAS a softwaru HEC-RAS. Použitými základními vstupními údaji byly N-leté průtoky Q_1 , Q_2 , Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} , příčné profily, podélný profil, drsnosti, geometrie objektů na toku a digitální model reliéfu 5. generace. Vytvořením modelu a grafických mapových výstupů byly splněny cíle práce.

Z informací uvedených v práci je patrné, že protipovodňová ochrana je velmi složitým oborem, který vyžaduje komplexní řešení, která však nejsou v možnostech jedinice. Pro jejich navržení a úspěšnou realizaci je třeba skupiny lidí s vysokými odbornými znalostmi z různých oborů. Hledání nejefektivnějšího, ekonomického, ekologického a sociálního řešení protipovodňové ochrany je úzce provázáno s tvorbou modelu a následnou simulací.

Z vytvořených grafických výstupů modelu je patrné, že zvolený úsek toku Želivka je potenciálně ohrožen povodní. Hrozba povodně je především nasměrována na samotnou obec Želiv, ale i na chatařské oblasti situované zejména do horní části zvoleného úseku. Z N-letých průtoků jsou reálným nebezpečím průtoky Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} . Průchod těchto průtoků není už koryto toku schopné pojmout a dochází k vybřežení. Míra vylití toku ze svého koryta je samozřejmě závislá na kulminačním průtoku, který je reprezentován dobou opakování jednou za N-let.

Práce je přínosná k pochopení základní problematiky povodní a protipovodňových opatření. Dále pak poskytuje podrobný popis povodí řeky Želivka. Nejvýznamnějším přínosem je popis procesu vedoucí k sestavení hydraulického modelu daného území a vytvoření grafických příloh z výstupu modelu. Popis postupu vytváření modelu se dá považovat za vzorový pro vytváření simulace, podle kterého se dovedou orientovat i nezkušení uživatelé softwarů GeoRAS a HEC-RAS.

Vytvořené grafické výstupy mají mapovou podobu. Jsou ve stavu, který umožňuje přímo vyhodnocovat povodňové průtoky a určovat objekty, které budou zasaženy při průchodu povodňové vlny o určitém průtoku a době opakování. Svým zpracováním dosahují úrovně obvyklé pro základní podklady pro návržení a vytvoření protipovodňových opatření a pro sestavení povodňových plánů. Tím se práce dá chápat jako jeden z prvních a zároveň hlavních podkladů ochrany majetku a lidských životů před povodněmi. Z výsledků je dále patrné, že počítačové modelování povodňových průtoků je velmi silným nástrojem pro simulaci povodní a k následnému návrhu a realizaci protipovodňových opatření.

11 LITERATURA A POUŽITÉ ZDROJE

Publikace

BALVÍN P, GABRIEL P, BOUŠKA P, HAVLÍK A. *Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2009, 91 s.

BARDOSSY A. *Calibration of Hydrological Model Parameters for Ungauged Catchments*. Hydrology and Earth System Sciences, 2007.

BARTOŠKA M, BUČEK A, CÍLEK V a kol. *Vodstvo a podnebí v České republice v souvislosti se změnou klimatu*. Praha: Pro Ministerstvo zemědělství ČR vydal Consult, 2009, 255 s. ISBN 978-80-903482-7-1.

BECKER, A. a P. SERBAN. *Hydrological models for water-resources system design and operation*. *Operation Hydrology*. 1990, (34): 80.

BLAŽEK V. *Voda v České republice*. Praha: Pro Ministerstvo zemědělství vydal Consult, 2006, 253 s. ISBN 80-903-4821-1.

BRÁZDIL R a ELLEDER L. *Historie počasí a podnebí v Českých zemích: Selected chapters from the history of floods and hydrological services in the Czech Republic*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2005, 369 s. ISBN 80-210-3864-0.

BRUNNER G. W. : *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual: Version 4.1*. Davis, California: US Army Corps of Engineers, 2010.

ČAMROVÁ L, JÍLKOVÁ J. *Povodňové škody a nástroje k jejich snížení*. Vyd. 1. Praha: Institut pro ekonomickou a ekologickou politiku (IEEP) Fakulty národohospodářské, Vysoká škola ekonomická v Praze, 2006, 418 s. ISBN 80-866-8435-0.

DAŇHELKA J, KUBÁT J, ŠERCL P, ČEKAL R. *Povodně v České republice v červnu 2013*. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2014, 85 s. ISBN 978-80-87577-41-7.

DAŇHELKA J, ELLEDER L. *Vybrané kapitoly z historie povodní a hydrologické služby na území ČR: Selected chapters from the history of floods and hydrological services in the Czech Republic*. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2012, 181 s. ISBN 978-80-87577-12-7.

HAVLÍK A. *Metodika odhadu kulminačního průtoku při povodňových průtocích pomocí hydraulických výpočetních postupů*. Praha: ČVUT, 2013.

HRÁDEK F, KUŘÍK P. *Hydrologie*. Vyd. 1. Praha: Credit, 2002, 271 s., 1 mapa. ISBN 80-213-0950-4.

HUBAČÍKOVÁ V. *Hydrologie*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002, 43 s. ISBN 80-715-7638-7.

JANDORA J, STARA V, STARÝ M. *Hydraulika a hydrologie*. Vyd. 2., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 186 s. ISBN 978-80-7204-739-0.

JENÍČEK M. *Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích: Vliv změn přírodního prostředí a údolní nivy na povodňové riziko*. Praha: PŘF UK, 2005.

JOWETT I. G., DUNCAN M. J. *Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river*. *Ecological Engineering*. 2012, 48.

JUST T a kol. *Vodohospodářské revitalizace a jejich uplatnění v ochraně před povodněmi*. Praha: Český svaz ochránců přírody, 2005, 359 s. ISBN 80-239-6351-1.

KANTOR P, KREČMER V, ŠACH F, ŠVIHLA V, ČERNOHOUS V. *Lesy a povodně: souhrnná studie*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2003, 48 s. ISBN 80-721-2255-X.

KEMEL M, VRÁNA K. *Hydrologie: [Urč. pro posl fak. staveb.]*. Dot. Praha: České vysoké učení technické, 1994, 222 s., 11 vol. příl. ISBN 80-010-0509-7.

KEMEL M. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996, 289 s. ISBN 80-010-1456-8.

KNEBL M. R., YANG Z. L, HUTCHISON K, MAIDMENT D. R. *Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a Case Study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event*. *Journal of Environmental Management*. 2005, (75): 325-336.

KONVIČKA M a kol. *Město a povodeň: strategie rozvoje měst po povodních*. 1. vyd. Brno: ERA, 2002, viii, 219 s. ISBN 80-865-1738-1.

KOVÁŘ P, ŠTIBINGER J. *Metodika návrhu a výstavby optimální varianty protipovodňových a protierozních opatření (PPPO) pro zmírnění extrémních hydrologických jevů - povodní a sucha v krajině: zpráva za rok 2008*. Vyd. 1. V Praze:

Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, katedra biotechnických úprav krajiny, 2009, 39, 29, [8] s. ISBN 978-80-213-1883-0.

LANGHAMMER J a kol. *Povodně a změny v krajině*. Praha: Katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze, 2007, 396 s. ISBN 978-80-86561-86-8.

MÁCA P, NECHVÁTAL M, KULHAVÝ Z, SOUKUP M. *Monitoring a vyhodnocení extrémních odtokových poměrů v povodí drobných vodních toků z hlediska prevence a zmírňování povodňových škod: sborník workshopu grantového projektu NAZV 1G46040*. Vyd. 1. V Praze: KVHEM FŽP ČZU, 2008, ii, 95 s. ISBN 978-80-213-1850-2.

OBLASTNÍ SDRUŽENÍ VODOHOSPODÁŘŮ ČR KUTNÁ HORA. *Voda a pozemkové úpravy 1999: sborník*. Vyd. 1. Kutná Hora: Oblastní sdružení vodohospodářů ČR, 1999. ISBN 80-020-1280-1.

POKORNÁ D, ZÁBRANSKÁ J. *Hydrologie a hydrogeologie*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008, 218 s. ISBN 978-80-7080-707-1.

PUKL O, *Časopis stavebnictví: Vodohospodářské stavby, Protipovodňová opatření při řece Smědá v okolí obce Višňová*, Praha: Časopis stavebnictví, 2014.

PVL s. p., *Plán dílčího povodí Dolní Vltava – Stav útvarů povrchových vod v povodí Želivky a program opatření v povodí vodárenské nádrže Švihov. Povodí Vltavy, státní podnik*, 2014.

ŘÍHA J. *Ochranné hráze na vodních tocích*. Praha: Grada Publishing a.s., 2010. edice stavitel. ISBN 978-80-247-3570-2.

ROUB R, HEJDUK, T, NOVÁK, P. Automating the Creation of Channel Cross Section Data from Aerial LaserScanning and Hydrological Surveying for Modeling Flood Events. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2012, roč. 60, č. 4, s. 216-231. ISSN: 0042-790X.

ŘÍHA J. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1997, 185 s. ISBN 80-214-0827-8.

SBORNÍK. *Voda v krajině a pozemkové úpravy: 4. konference voda v krajině a pozemkové úpravy*. Kutná hora: Oblastní sdružení vodohospodářů ČR, 1998. ISBN 80-02-01209-7.

SBORNÍK. *Voda v krajině a pozemkové úpravy*. Kutná hora: Oblastní sdružení vodohospodářů ČR, 1999. ISBN 80-02-01280-1.

STÁTŇÍKOVÁ P. *Povodně a záplavy*. Vyd. 1. V Praze: Paseka, 2012, 189 s. Zmizelá Praha. ISBN 978-80-7432-182-5.

ŠEDIVÝ V, VRÁNA K. *Vodní hospodářství: hydraulika, malé vodní nádrže, revitalizace krajiny*. Vyd. 1. Vodňany: Střední rybářská škola a Vyšší odborná škola vodního hospodářství a ekologie, 2011, 235 s. ISBN 978-80-87096-14-7.

TLAPÁK V, HERYNEK J. *Úpravy vodních toků a hrazení bystřin*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2001, 146 s. ISBN 80-715-7551-8.

Vodní hospodářství: Specializovaný vědeckotechnický časopis pro projektování, realizaci a plánování ve vodním hospodářství a souvisejících oborech životního prostředí. Praha: Vodní hospodářství, 2011, **61**(6). ISBN 1211-0760.

Vodní hospodářství: Specializovaný vědeckotechnický časopis pro projektování, realizaci a plánování ve vodním hospodářství a souvisejících oborech životního prostředí. Praha: Vodní hospodářství, 2011, **61**(8). ISBN 1211-0760.

Vodní hospodářství: Specializovaný vědeckotechnický časopis pro projektování, realizaci a plánování ve vodním hospodářství a souvisejících oborech životního prostředí. Praha: Vodní hospodářství, 2012, **62**(9). ISBN 1211-0760.

WARNER J. C., BRUNNER G. W, PIPER S. S. *HEC-RAS, River Analysis System Applications Guide: Version 4.1*. Davis, Calofornia: US Army Corps of Engineers, 2010.

Legislativa

ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. 2014.

ČSN 75 0110. *Vodní hospodářství: Terminologie hydrologie a hydroopedologie*. 2010.

Zákon č. 254/2001 Sb. O vodách a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů (vodní zákon)

Schválené vládní usnesení č. 382 ze dne 19. dubna 2000, Strategie ochrany před povodněmi v České republice

Internetové zdroje

ČHMU, Český hydrometeorologický úřad: Typy povodní, online: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/vystava/HYDRO/14.pdf>, cit. 6. 10. 2015.

MŽP, Ministerstvo životního prostředí, 2004: Akční program udržitelné ochrany před povodněmi v povodí Dunaje, online: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/akcni_program_ochrana_dunaj/\\$FILE/OOV_Akcni-program-povodne-MKOD_20041118.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/akcni_program_ochrana_dunaj/$FILE/OOV_Akcni-program-povodne-MKOD_20041118.pdf), cit 21. 10. 2015

MŽP, Ministerstvo životního prostředí, 2000: Strategie ochrany před povodněmi ČR, online: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/strategie_ochrany_povodne/\\$FILE/OOV_strategie_povodne_20000419.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/strategie_ochrany_povodne/$FILE/OOV_strategie_povodne_20000419.pdf), cit 7. 10. 2015.

Možnosti řešení povodňových situací na Česko-slovenském příhraničí, Protipovodňová opatření, online: <http://www.cs-povodne.eu/Protipovodnova-ochrana-a-povodne/Protipovodnova-opatreni>, cit 14. 10. 2015.

12 SEZNAM VZORCŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ

Seznam vzorců:

Vzorec 1: Základní bilanční rovnice

Vzorec 2: Soustava Sait Venantových rovnic

Vzorec 3: Metoda po úsecích

Vzorec 4: Energetická ztráta

Vzorec 5: Chézyho rychlostní součinitel dle Manninga

Vzorec 6: Střední průřezová rychlost

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Hodnoty průtoku

Tabulka 2: Manningovy drsnostní součinitele

Tabulka 3: Průtokové charakteristiky stanic

Tabulka 4: N-leté průtoky profilů

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Energetické ztráty

Obrázek 2: Povodí Želivka

Obrázek 3: Vodní nádrž Sedlice

Obrázek 4: Vodní nádrž Vřesník

Obrázek 5: Jez Bělský mlýn

Obrázek 6: Jez Lhotice

Obrázek 7: Jez Tukleky

Obrázek 8: Jez Želiv

Obrázek 9: Jez Rokosův mlýn

Obrázek 10: Jez Kordovkso

Obrázek 11: Most Miletín – Senožaty

Obrázky 12: Most Křelovice – Želiv

Obrázek 13: Inundační pole Křelovice – Želiv

Obrázek 14: Most Želiv – klášter

Obrázek 15: Most Želiv – Sedlice

Obrázek 16: Most vodní elektrárna Sedlice

Obrázek 17: Lávka Poříčí

Obrázek 18: Lávka Želiv

Obrázek 19: Vodní elektrárna Sedlice

Obrázek 20: TIN

Obrázek 21: Příčný profil

Obrázek 22: HEC-RAS

13 PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha 1: Želivka příčné profily

Příloha 2: Želivka záplavové území

Příloha 3: Želivka záplavové území (Q100)

Příloha 4: Želivka záplavové území (Q50)

Příloha 5: Želivka záplavové území (Q20)

Příloha 6: Želivka záplavové území (Q10)

Příloha 7: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území

Příloha 8: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q100)

Příloha 9: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q50)

Příloha 10: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q20)

Příloha 11: Želiv 52,5 – 54,5 ř. km záplavové území (Q10)

Příloha 12: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území

Příloha 13: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q100)

Příloha 14: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q50)

Příloha 15: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q20)

Příloha 16: Chatová oblast 56,75 – 58,25 ř. km záplavové území (Q10)

Příloha 17: Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území

Příloha 18: Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q100)

Příloha 19: Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q50)

Příloha 20: Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q20)

Příloha 21: Chatová oblast 58,25 – 61,00 ř. km záplavové území (Q10)