

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Fakulta životního
prostředí

**APLIKACE MATEMATICKÝCH MODELŮ
PRO SIMULACI HYDROLOGICKÝCH POMĚRŮ
NA VYBRANÝCH VODNÍCH TOCÍCH**

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS
FOR SIMULATION OF HYDROLOGICAL CONDITIONS
IN SELECTED STREAMS

Disertační práce

Marie Kurková

Školitel: doc. Ing. Zdeněk Vašků, CSc.

Praha 2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Aplikace matematických modelů pro simulaci hydrologických poměrů na vybraných vodních tocích“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Vašků, CSc., s využitím uvedených literárních pramenů nebo ve spolupráci s autory uvedených publikací.

Současně dávám souhlas k uveřejnění této disertační práce na webových stránkách Fakulty životního prostředí.

V Praze 31. 8. 2015

Marie Kurková

PODĚKOVÁNÍ

Při této příležitosti bych chtěla poděkovat všem, kteří mi pomáhali a podporovali ve studiu a umožnili mi tak obohatit se o nové znalosti a zkušenosti a podíleli se na vzniku této práce.

Děkuji zejména manželovi a celé rodině za podporu a jejich trpělivost. Dále vedoucímu disertační práce doc. Ing. Zdeňkovi Vašků, CSc., a také Ing. Radku Roubovi, PhD., za cenné připomínky, všestrannou pomoc a spolupráci při získávání podkladů a zpracování disertační práce.

OBSAH

1 ÚVOD	1
2 CÍLE PRÁCE	3
3 MATEMATICKÉ MODEL Y	5
3.1 KLASIFIKACE MODELŮ	5
3.1.1 Rozdělení podle principu matematického modelu	5
3.1.2 Rozdělení podle Světové meteorologické organizace (WMO	8
3.1.3 Rozdělení podle Singha (1995)	8
3.1.4 Rozdělení podle prostorové schematizace	10
3.2 KRITÉRIA PRO VÝBĚR MODELŮ	15
4 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MODELŮ	17
4.1 HYDRODYNAMICKÝ MODEL HEC-RAS	17
4.1.1 Základní výpočetní schéma	17
4.1.2 Stavové veličiny	18
4.1.3 Parametry modelu	18
4.1.4 Počáteční a okrajové podmínky	19
4.1.5 Způsob zadávání vstupních dat	19
4.1.6 Způsob prezentace výstupů	19
4.2 HYDRODYNAMICKÝ MODEL MIKE 11	20
4.2.1 Základní výpočetní schéma	20
4.3 HYDRODYNAMICKÝ MODEL HYDROCHECK	21
4.3.1 HYDROCHECK 1	21
4.3.2 HYDROCHECK 2	21
4.3.3 HYDROCHECK 3	22
4.3.4 Vstupní a výstupní parametry modelu	22
4.4 HYDROLOGICKÝ MODEL HEC-HMS	23
4.4.1 Základní výpočetní schéma	23
4.4.2 Výstupní parametry modelu	24
4.5 HYDROLOGICKÝ MODEL DESQ – MAXQ	24
4.5.1 Základní výpočetní schéma	24
4.5.2 Vstupní a výstupní parametry modelu	24

5	PODKLADOVÁ DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	26
5.1	GEODETICKÉ ZAMĚŘENÍ	26
5.2	FOTOGRAMMETRIE	27
5.3	LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ (LLS)	27
5.4	HYDROLOGICKÉ MĚŘENÍ	29
6	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	31
6.1	ČLÁNEK I.	32
6.2	ČLÁNEK II.	36
6.3	ČLÁNEK III.	41
7	KOMENTÁŘ	62
8	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	77
	PŘÍLOHA 1	83

1. ÚVOD

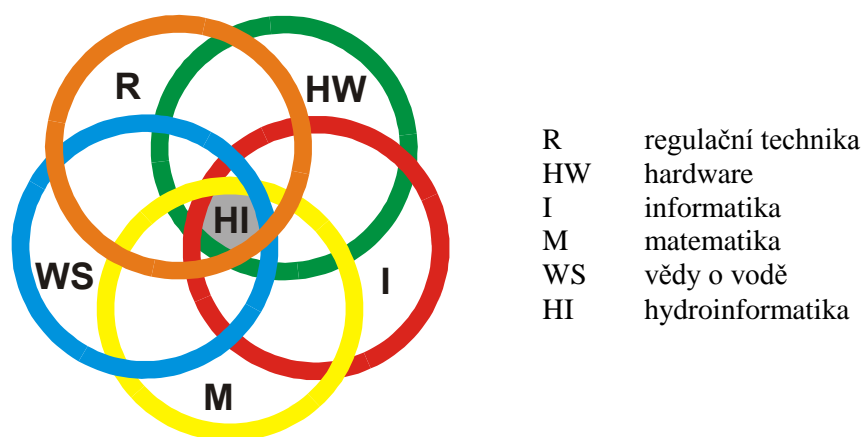
Voda je základní složkou přírodního a životního prostředí. Dostatečné množství dobré vody je nezbytným předpokladem zachování života na Zemi, předpokladem dalšího rozvoje lidské společnosti. Voda nejen slouží, ale i škodí – v období jejího nadbytku, za povodňových situací vzniklých po velkých deštích nebo táním sněhu, je velmi nebezpečná – je schopna během velmi krátké doby svým dynamickým účinkem zničit výsledky práce celých generací a nezdědala si povodeň vyžádá i lidské oběti.

Povodně provázejí lidstvo od nepaměti. V přírodě jsou naprosto přirozeným úkazem, který má svou nenahraditelnou roli a pro správné fungování krajiny je nepostradatelný. Povodeň je přírodní jev, který se vyskytuje v různé intenzitě a nepravidelných časových intervalech. Povodně představují pro Českou republiku největší přímé nebezpečí v oblasti přírodních katastrof a mohou být i příčinou závažných krizových situací, při nichž vznikají nejenom rozsáhlé materiální škody, ale rovněž ztráty na životech obyvatel postižených území a dochází k rozsáhlé devastaci kulturní krajiny včetně ekologických škod. Častější hrozba povodní je dávana do souvislosti s probíhajícími změnami klimatu, které vyvolávají rostoucí nerovnoměrnosti v rozdělení srážek v čase i v prostoru povodí. Stále častěji je zaznamenáváno povodňové ohrožení vyvolané místními přívalovými dešti, jejichž výskyt nelze předem s dostatečným časovým předstihem předpovědět.

Na základě těchto skutečností se hydroinformatika stala dnes dynamicky se rozvíjejícím se oborem a nezbytným nástrojem podpory rozhodování i projektování a tedy i významnou disciplínou v řešení problémů v oblasti vodního hospodářství a životního prostředí. Její prostředky jsou stále častěji využívány při řešení úloh v oborech aplikované hydrologie, hydrauliky, v oblasti výzkumné, i projekční i investiční.

Hydroinformatiku jakou novou vědní disciplínu lze chápat ze dvou samostatných pohledů. V prvé řadě se jedná o vazbu na teorie věd o vodě (water science), z nichž koncem osmdesátých let vzešla, ale současně se do jejich prostředků snažíme začlenit i potenciál nových poznatků informatiky a odvětví s ní spojených, které se tak staly nezbytným předpokladem dalšího vývoje. Hydroinformatika v dnešním pojetí není jen pouhou vědou o numerických metodách hydrologie a hydrauliky a algoritmizace hydrologických procesů. Technologie globálních počítačových sítí, geografických informačních systémů (GIS) a systémů CAD se v oblasti aplikované hydrologie vniká stále výrazněji do vývoje informačních a řídicích systémů nové generace a to v jak oblasti operativní a režimové hydrologie tak i v oblasti řízení vodního hospodářství.

Základní pilíře hydroinformatiky tvoří tři vědní obory – vědy o vodě, informatika a další aplikované obory s vědami o vodě souvisejícími. V oblasti hydroinformatiky se jedná o průnik dalších vědních oborů a technologií. Základním cílem hydroinformatiky je integrace základních vědecko-technických informací, právnických norem, zvyklostí, objektivních požadavků společnosti z oboru vodního hospodářství a ochrany životního prostředí do objektivní a reprezentativní formy, čitelné širokou veřejností.



Obr. 1: Vztah hydroinformatiky a souvisejících vědních oborů a technologií

2. CÍLE PRÁCE

Cílem práce je vytvoření matematické reprezentace – matematických modelů pro simulaci hydrologických poměrů na vybraných vodních tocích. Jedná se o modelaci průtoku povodňové vlny v ustáleném proudění.

Při samotné volbě matematického modelu pro provádění simulace jsou rozhodující vstupní data. Pro dosažení cíle je rozhodující zajištění odpovídajících vstupních dat požadovaného rozsahu a kvality. Pro zpracování hydraulických výpočtů pomocí matematických modelů, vyhodnocení výsledků simulací i pro zpracování následujících analýz jsou použity různé způsoby pořízení těchto dat, kterými jsou geodetické zaměření příčných profilů (koryto a inundace) a letecké laserové skenování.

První studie provedená na části vodního toku Úhlavy v lukách u Příchovic blízkosti města Přeštice posuzuje návrh protipovodňových opatření. Návrh opatření je součástí dokumentace k územnímu řízení: Přeštice – Inundační průlehovité koryto v lukách u Příchovic. Posuzovaná dokumentace byla zhotovena na základě hydrotechnických výpočtů a zkušeností z povodně v srpnu 2002. Jako matematický model byl vybrán nekomerční software HEC-RAS, verze 3.1.1. Z provedeného posouzení navržených protipovodňových opatření by mělo být zřejmé, zda jsou navržena efektivně. Matematický model připravený pomocí uvedeného softwaru je možné využít jako podklad pro poskytnutí podpory při realizaci navržených opatření.

Ve druhé studii je prakticky využit matematický model pro hydrotechnické posouzení drobných vodních toků v katastrálním území obce Mochtín. Posouzení je založeno na matematickém modelování odtokového a hladinového režimu na vybraných vodních tocích. K vlastní simulaci je použit nekomerční software HEC-RAS. Provedené posouzení by mělo ukázat na riziková místa v obci Mochtín. Matematický model připravený pomocí uvedeného softwaru je možné využít jako podklad pro přehodnocení plánovaných akcí zahrnutých do územního plánu nebo jako zdroj základního přehledu o možnostech protipovodňové ochrany na úrovni menší obce.

Výsledky modelování mohou přispět k návrhu efektivní ochrany před povodněmi. Je důležité zdůraznit, že práce si neklade za cíl realizaci testovaných protipovodňových opatření. Jedná se o modelové studie, jejichž cílem je kvantifikace vlivu daných opatření na konkrétním experimentálním území a obecné posouzení použitých modelů a modelovacích technik.

Třetí studie se zabývá syntézou dat z hydrologického měření a leteckého laserového skenování (LLS), které se nabízejí jako alternativa k využití dat z geodetického měření pro

potřeby vodohospodářské účely. Jde o sestavení hydrodynamického modelu s využitím dat digitálního modelu reliéfu (DMR) 5. generace a porovnává jeho výstupy při různých průtocích s modelem založeným na výškopisných datech upravených pomocí nástroje CroSolver, který se snaží eliminovat chyby vstupních dat do hydrodynamického modelování vycházející z LLS. Jedná se o srovnání výstupů hydrodynamických modelů v programu HEC-RAS při použití zahloubených dat a při použití neupraveného DMR. Srovnání je provedeno na úsecích dvou vodních toků s odlišnou morfologií terénu a velikostí toku. První zájmovou lokalitou je úsek vodního toku Otava v Písku, druhou je úsek vodního toku Úhlava v Přešticích. Doplňujícím výstupem je porovnání záplavových území vycházejících z obou variant modelů.

3. MATEMATICKÉ MODELY

Již sama složitost hydrologického cyklu předurčují širší nabídky matematických modelů. Matematické modelování je založeno na podobnosti mezi reálným a abstraktním systémem, kdy k popisu zkoumaného jevu a abstraktního systému jsou použity obyčejné či parciální diferenciální rovnice nebo jejich soustavy. V případě modelování proudění vody se obvykle jedná o systém řídicích rovnic tvořený rovnicí kontinuity a pohybovými rovnicemi. Tyto složité rovnice jsou kromě jednoduchých případů řešitelné pouze metodami numerické matematiky.

Matematické modely se vyznačují schopností simulovat řadu povodňových situací ve skutečnosti dosud nepozorovaných a možnost zkoumání řady variant protipovodňových opatření a optimalizace výsledného návrhu před vlastní realizací. Modely usnadňují pochopení vztahů mezi příčinami a následky v oblasti hydrometeorologických veličin, odkrývají závislosti v jejich pozorováních a objasňují vazby mezi měřenými srážkami a jednotlivými fázemi odtoku. Matematické modely se staly standardním prostředkem k ověřování funkčnosti stávajících nebo budoucích předpovědí, ověřování navržených protipovodňových opatření aj. Modely slouží jako nástroje, které jsou navrhovány pro specifické účely.

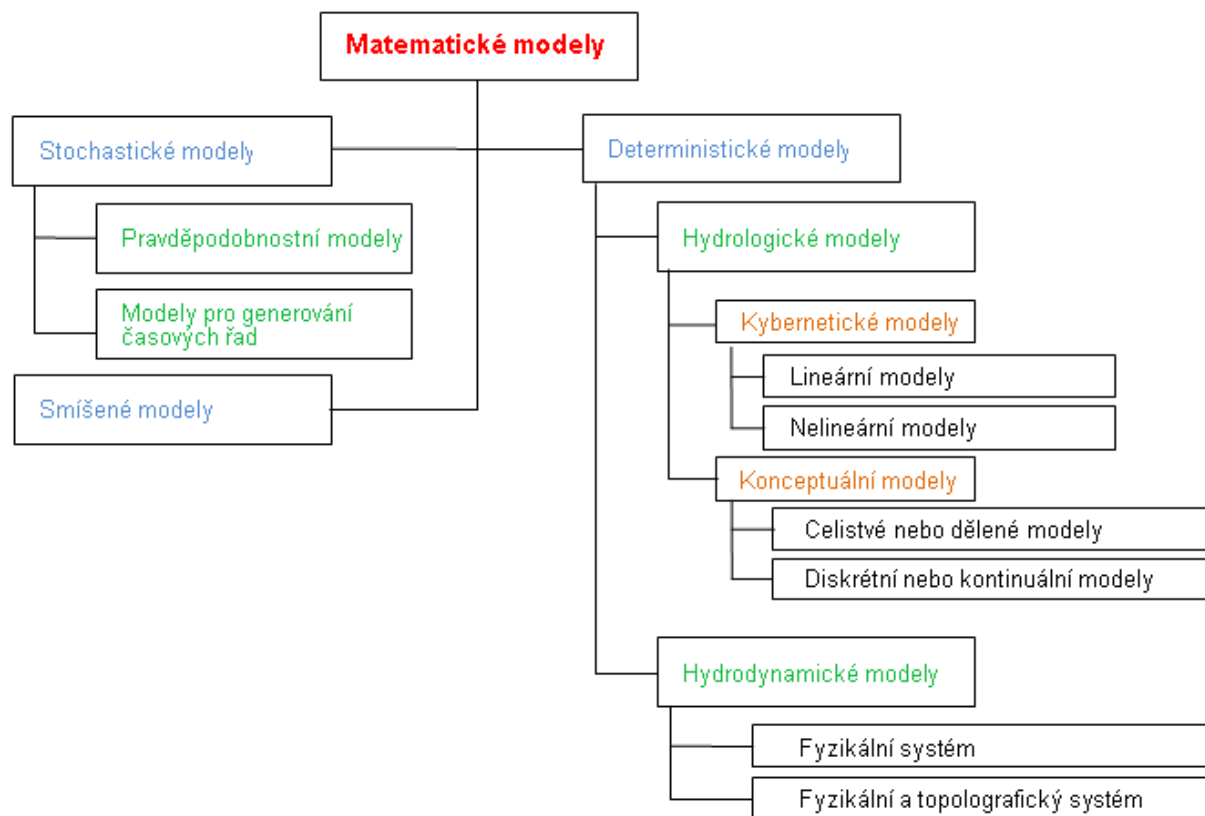
Charakteristickým rysem modelů současné generace je jejich návaznost na klimatické podmínky, resp. meteorologické veličiny, které představují nejčastější vstupy pro simulace odtoku, a na hydraulické koncepce, jež tvoří základ schémat pro výpočty pohybu vody v povodí a říčních koryt.

3.1 KLASIFIKACE MODELŮ

Matematické modely proudění vody lze členit podle různých kritérií a hledisek.

3.1.1 Rozdělení podle principu matematického modelu

V oblasti matematického modelování uznává hydrologie tyto hlavní principy modelů: stochastické a deterministické, případně ještě smíšené.



Obr. 2: Schématické znázornění rozdělení podle principu matematického modelu

I. Stochastické modely

Stochastické modely v hydrologii představují skupinu modelů, které se dají charakterizovat absencí vazebnosti mezi příčinou a následkem hydrologického jevu v rámci charakterizovaného systému. Tyto modely se mohou dále ještě dělit na dva typy modelů.

a) Pravděpodobnostní modely

Pravděpodobnostní modely (Stochastic Probabilistic models) lze charakterizovat tím, že jsou reprezentovány hydrologickými funkcemi s daným pravděpodobnostním rozdělením tak jako např. průtoky Q (kulminační průtoky, minimální průtoky), vodní stavy h a retenční objemy V . Tyto funkce jsou obvykle charakterizovány základními statistickými charakteristikami, jako je aritmetický průměr, směrodatná odchylka, součinitel variace a šikmosti aj.

b) Modely pro generování časových řad

Modely pro generování časových řad (Stochastic Time series generation) se používají pro extrapolaci časových řad hydrologických parametrů při zachování základních statistických

charakteristik. Extrapolací (predikcí, předpovědí) se rozumí odhad členů posloupnosti mimo interval pozorovaných hodnot. Nejdůležitější je spolehlivost odhadu, která vyjadřuje míru shody mezi budoucí a skutečnou hodnotou a její prognózou. Extrapolace se metodicky opírají především o teorii časových řad a jejich matematické modely.

II. Deterministické modely

Deterministické modely mají za úkol popisovat pomocí matematických vztahů fyzikální systém. Jsou popsány vztahem závislých proměnných (výstupní veličiny) a nezávislých proměnných (vstupní veličiny):

$$y = f(x, a)$$

kde a jsou koeficienty nebo parametry popisující chování systému.

Přesnost popisu fyzikálního systému modelem se může zvyšovat s ohledem na kvalitu vstupních dat, protože se stoupající přesností popisu stoupají i nároky na vstupní data. Podle kvantity a kvality pozorovaných proměnných a odvozených parametrů se ustálilo základní rozdělení deterministických modelů do dvou skupin.

a) Hydrologické modely

▪ Kybernetické modely

Kybernetické modely (Deterministic Black Box – DB modely) využívají metody systémové analýzy z oboru kybernetiky. Nezajímají se o strukturu modelovaného systému a zabývají se pouze transformačním účinkem. Základem kybernetických modelů je tedy transformační funkce systému, jejíž parametry se stanovují na základě pozorovaných dat (vstupní data/výstupní data).

▪ Konceptuální modely

Konceptuální modely (Deterministic Conceptual - Gray Box – DC modely) odrážejí základní zákonitosti ve zjednodušené formě s určitou mírou empirických vztahů, které nahrazují složité vazby komplexního popisu chování hydrologického systému. Konceptuální modely popisují matematicky hlavní hydrologické procesy.

b) Hydrodynamické modely

Hydrodynamické modely (Deterministic Hydrodynamic Laws – White Box – DL modely) fyzikálně popisují realitu nejuvěrněji. Respektují principy zachování hmoty, hybnosti a energie.

Jsou to modely s geometricky rozdělenými parametry, které popisují řešené procesy pomocí diferenciálních rovnic. Struktura systému je u hydrodynamických modelů vložena přímo do základních rovnic. Modely mohou popisovat vybrané dílčí hydrologické procesy (komponentní modely) nebo všechny hydrologické procesy v povodí (komplexní modely).

- Komponentní modely
- Komplexní modely

III. Smíšené modely

Mezi stochastickými a deterministickými modely dochází k jistému překrývání a dostáváme tím modely smíšené. Tyto modely pak obsahují submodely stochastické i deterministické povahy a sestavují se pro zdokonalení výstupů deterministického modelu.

3.1.2 Rozdělení podle Světové meteorologické organizace (WMO)

V obecné formě představuje dle směrnice (WMO, 1994) matematický model určitého procesu kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními stavovými veličinami. Modely jsou děleny do následujících kategorií.

- Systémové přístupy
- Koncepční modely
- Hydrodynamické modely
- Stochastické modely

Modely koncepční a hydrodynamické jsou založeny na deterministických principech a předpokládají opakovatelnost hydrologického jevu. Modely stochastické vychází naopak z neopakovatelnosti hydrologického jevu.

3.1.3 Rozdělení podle Singha (1995)

V tomto případě jsou matematické modely děleny z hlediska přístupu k řešení proudění vody s volnou hladinou podle volby výchozí soustavy řídicích rovnic a metody použité k jejich numerickému řešení.

I. Matematická formulace procesu

Z hlediska matematické formulace procesu zahrnuje model 5 složek – geometrie systému, vstupní a výstupní veličiny, řídicí rovnice procesu, počáteční a okrajové podmínky. V tomto kritériu jsou modely rozlišovány do dvou skupin. (Patera et al., 2002)

Modely soustředěných parametrů (lumped, 0D)

Modely soustředěných parametrů využívají zjednodušeného přístupu ke geografické schematizaci povodí a předpokládají prostorovou informaci soustředěnou do jediného bodu. V převážné většině jsou proto vyjádřeny obyčejnými diferenciálními rovnicemi v rozměru 0 D, doplněnými o empirické algebraické vztahy.

a) Modely distribuované (1D, 2D nebo 3D)

Modely distribuované eliminují zjednodušující předpoklad soustředění informace o hydrologických charakteristikách povodí do jediného bodu a zavádějí prostorovou závislost do modelovaných procesů v rozměru 1D, 2D, zřídka 3D. Je založen na řešení parciálních diferenciálních rovnic.

II. Kontext časové a prostorové oblasti

V tomto pohledu jsou modely uvažovány ve vztahu k časovému kroku nebo k rozsahu modelované oblasti. Časový krok sběru hydrometeorologických informací může ovšem být odlišný od výpočtového kroku, tyto veličiny jsou odvozovány ze dvou různých zdrojů. V tomto kontextu rozlišujeme:

- kontinuální
- s krátkým výpočtovým krokem (řádu 1 min. až 1 hod.)
- s dlouhým výpočtovým krokem (denní, dekadní, měsíční nebo roční)

Volbu časového kroku určuje několik činitelů jako například frekvence přenosu dat, stabilita numerických schémat a v neposlední řadě i sledovaný cíl uplatnění modelu.

V prostorovém měřítku rozlišujeme obvykle metody modelování malých (do 100 km²), středních (100 až 1000 km²) a velkých povodí (nad 1 000 km²). Toto vymezení je velmi neurčité a při volbě typu modelu pro určitou zájmovou oblast je dáována přednost individuálnímu úsudku.

III. Numerické metody řešení pomocí řídicích rovnic

Jednorozměrné modely proudění vody jsou nejčastěji založeny na aplikaci metody sítí, nazýváme též metoda konečných diferencí. U vícerozměrných modelů jsou v současnosti nejčastěji používané různé metody pro řešení parciálních diferenciálních rovnic při matematickém modelování proudění vody. Jedná se o metodu sítí, metodu konečných objemů (MKO) nebo metodu konečných prvků (MKP).

3.1.4 Rozdělení podle prostorové schematizace

Použitá prostorová schematizace ovlivňuje volbu vhodného matematického modelu a předpokládanou využitelnost výsledků modelování.

I. Jednorozměrné modely – 1D

1D matematické modely doznaly dosud nejširšího uplatnění při řešení jak ustáleného, tak neustáleného proudění v otevřených korytech a v systémech otevřených koryt. Pro jednorozměrné modely k řešení proudění vody v otevřených korytech jsou výchozí matematickou formulací rovnice – Saint -Venantovy rovnice. Lze je psát např. ve tvaru (Cunge – Holly – Verset, 1980):

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(UQ)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0\right) + gAS_f = 0$$

kde Q je průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], A průtočná plocha příčného řezu [m^2], $U=Q/A$ je střední průřezová rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], h je hloubka vody [m], S_0 je sklon dna [-], S_f je sklon čáry energie [-] a g je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Sklon čáry energie S_f reprezentuje celkové hydraulické odpory, které kromě tření na dně zahrnují i vlivy turbulence proudění, nerovnoměrnosti rychlostního pole v příčném řezu, prostorové efekty proudění apod. Zatímco u vícerozměrných (především třírozměrných) modelů jsou uvedené jevy alespoň přibližně postiženy přímo v řídicích rovnicích. U modelů jednorozměrných se jejich modelování v důsledku značné schematizace řešeného problému redukuje na vyjádření celkových hydraulických odporů pomocí aplikace různých empirických vztahů a parametrů k vyjádření Chézyho rychlostního součinitele.

Saint – Venantovy rovnice, které bývají někdy označovány jako „rovnice mělké vody“ (shallow water equations = SHE) jsou odvozeny z Navier – Stokesových rovnic popisujících nestlačitelné vazké tekutiny v případě, kdy hloubka je menší než horizontální délka. Proto lze Saint – Venantovy rovnice uvádět i v tomto tvaru:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hv) = 0$$

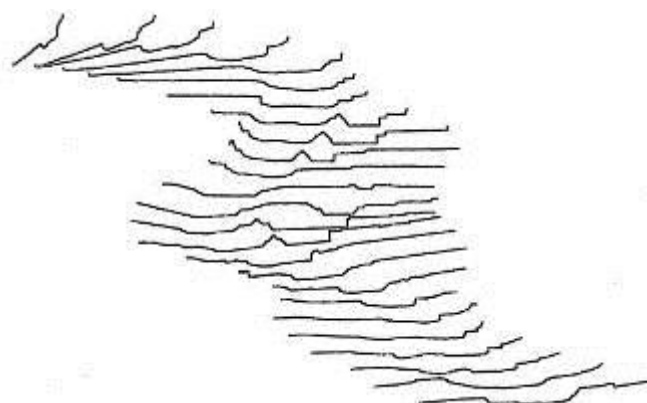
$$-\frac{\partial h}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial v}{\partial x} v + \frac{\partial v}{\partial t}$$

kde h je výška vodního sloupce, v je rychlost proudění kapaliny ve směru osy x (a má stejnou velikost v celém vodním sloupci) a ν je kinematická viskozita.

a) 1D modely – ustálené nerovnoměrné proudění

Proudění je chápáno jako jednorozměrné podél toku, pro příčné složky proudění je zaváděno zjednodušené řešení (aktivní, pasivní zóny v povodňovém režimu, možnost podélného ohrázování, možnost zavedení různých odporů proudění v hlavním korytě v inundacích). Tyto modely vychází většinou ze zákona zachování mechanické energie. Proudění vody je ustálené nezávislé na čase. Ztráty jsou vyjádřeny na základě drsností koryta. (Havlík et al., 2001)

Výpočetní schéma obvykle vychází z tradiční metody „po úsecích“, měly by umožnit výpočet různého charakteru toků (nížinné toky, bystřiny).



Zdroj: Valenta 2005

Obr. 3: Schematizace koryta a inundace pomocí příčných profilů v 1D modelu

Modelovaná oblast je přitom schematizována soustavou příčných profilů, přičemž se předpokládá, že proudění se děje ve směru spojnic mezi jednotlivými profily a lze ho zjednodušeně popsat v každém profilu pomocí polohy hladiny a střední průřezové rychlosti ve směru osy koryta.

Z tohoto poznání vyplývá, že každý příčný profil je ve výpočtu reprezentován jako jeden výpočetní bod. Tento způsob zjednodušení umožňuje 1D modelem popsat velmi rozsáhlá území s relativně malým počtem výpočetních bodů. Počet výpočetních bodů vstupujících do řešení pohybových rovnic má přímý vliv na délky výpočtu. 1D modely, díky numericky stabilním algoritmům řešení pohybových rovnic a navíc umožňují použití relativně delšího časového kroku výpočtu. A proto je řešení i velmi rozsáhlých oblastí realistické a v praxi běžně používané. (Patera et al., 2002).

b) 1D modely – neustálené nerovnoměrné proudění

V porovnání s předchozím typem modelů ustáleného proudění, zahrnují tyto modely časovou závislost vstupních i výstupních veličin. Model by měl splňovat všechny požadavky kladené jako na modely ustáleného stavu. Model je založen na numerickém řešení řídicích rovnic. Vychází ze dvou řídicích rovnic, zpravidla hybnostní a spojitostní. Řešení komplikují nespojitosti hydraulických charakteristik, například vodní skok, objekty na toku, náhlé změny v korytě a v průběhu časových řad (průlomové vlny). Výpočet probíhá ve zvolených časových krocích a pro každý se počítají v každém místě různé průtoky a různé hladiny vody. Lze tak sledovat rychlost pohybu kulminace povodně, transformaci průtoku ve sledovaném území atd. (Havlík et al., 2001)

V operativní hydrologii jsou předpovědní hydraulické modely velmi perspektivní, především proto, že mohou poskytnout řešení hladin, průtoků a rychlostí podél toku prakticky neomezeně. Tato výhoda se projeví především při výpočtu proudění v oblastech ovlivněných zpětným vzdutím nádrží nebo soutoků řek.

II. Dvourozměrné modely – 2D

Proudění je chápáno jako dvourozměrné, charakterizované prostorovým průběhem hladiny a prostorovým rozložením průměrných svislicových rychlostí se složkami ve směrech souřadnicových os. Tyto modely vycházejí většinou ze soustavy svisle integrovaných Reynoldsových rovnic pro prostorové turbulentní proudění a mohou být koncipovány pro řešení ustáleného či neustáleného proudění vody. Soustava rovnic bývá někdy označována jako

„shallow water equations“ (rovnice mělké vody). Rovnice jsou vhodné pro případy, kdy půdorysné rozměry oblasti, v níž voda proudí, výrazně přesahují hloubku. Rovnice má tvar (Kuipers – Vreudenhil, 1973):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial}{\partial x_i} (h + z_b) + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x_j} (h T_{ij}) + S_i; \quad i, j = 1, 2$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Tenzor efektivních napětí τ_{ij} je [Pa] je popsán Stokesovým vztahem:

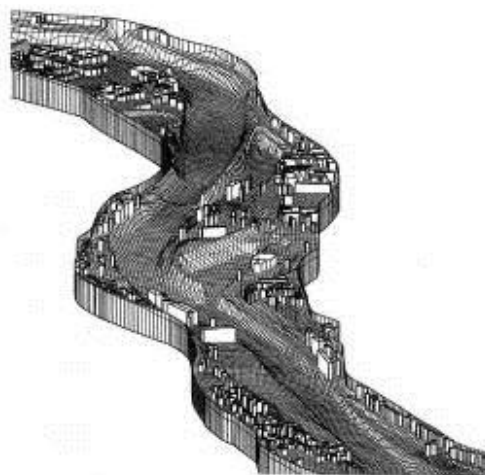
$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

Jedná se o dvě pohybové rovnice ve směrech x_1 a x_2 a rovnici kontinuity. V rovnicích značí u_i vektor průměrné svislicové rychlosti, t čas [s], g gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], h hloubku vody [m], z_b je svislá souřadnice polohy dna [m], ρ je hustota vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], μ je dynamická viskozita [Pa.s], δ_{ij} je symbol pro Kroneckerovo delta. V rovnicích se kromě hloubky h vyskytují jako další hledané neznámé složky průměrných svislicových rychlostí u_1 a u_2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Po výšce průměrované složky tenzoru efektivních napětí T_{ij} zahrnují napětí vznikající vlivem viskozity, turbulentní Reynoldsova napětí a napětí vlivem nerovnoměrnosti rychlostních profilů ve svislici. Člen S_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] v pohybových rovnicích zahrnuje obecně působení vnějších sil a napětí, jakými jsou např. tečné napětí na dně t_n [Pa], tečné napětí na hladině vlivem větru t_w [Pa] a Coriolisovo zrychlení f_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Vzhledem k formulaci tenzoru efektivních napětí obsahujícího Reynoldsova turbulentní napětí není systém rovnic uzavřený a musí být doplněn vhodným modelem turbulence.

Výpočetní schéma vychází z numerického řešení soustavy řídicích rovnic. Je založeno na metodě sítí (konečných diferenciací), metodě konečných objemů či metodě konečných prvků. Metoda sítí používá pravidelnou pravoúhlou výpočetní síť, pro popis složité geometrie modelované oblasti je vhodnější druhá či třetí metoda, umožňující aplikaci nepravidelné křivočaré či nestrukturované výpočetní sítě.

2D modely používají digitální reprezentaci modelovaného území komplexní třírozměrný popis oblasti ve formě podrobného digitálního modelu terénu. Dvourozměrné modely nejsou zatíženy zjednodušením aplikovaného v 1D modelech. Poskytují proto komplexnější a podrobnější výsledky.



Zdroj: Valenta 2005

Obr. 4: Schematizace koryta a inundačního území se zástavbou ve 2D modelu

Základním výstupem těchto modelů jsou jak podélné tak i příčné složky rychlostí v korytě i v inundačním území spolu s prostorovým tvarem hladiny. Modely jsou vhodné zejména pro komplikované případy proudění, u kterých není schematizace pomocí 1D modelu oprávněná či přípustná (tvarově složitá území, urbanizované oblasti, posuzování vlivů různých objektů na proudění vody apod.)

Aplikované modely umožňují posoudit účinky povodní v zasaženém území, zejména účinky způsobené silovými účinky vody. Lze rovněž odhadnout dopady povodňových průtoků ve formě ekonomicky vyjádřitelných škod. 2D modely jsou používány především pro lokální studie proudění v místech se složitými hydraulickými podmínkami, kde je zapotřebí detailní plošná znalost rozložení rychlostí, hloubek a průtoků. Klasickým případem tohoto typu studií jsou lokality v blízkém okolí mostů, soutoků, proudění ve složitém inundačním území, proudění v intravilánu obcí a další. (Havlík et al., 2001).

III. Třírozměrné modely – 3D

3D matematické modely jsou v současné době spíše ve fázi vývoje. Existují především v lokálních aplikacích pro řešení speciálních případů detailních studií proudění většinou v těsné

blízkosti hydraulických objektů (jezy, mosty, propustky, savky, přepady, oddělovače, plavební komory a jiné). Tato kategorie modelů je v současné době také zastoupena jen malým počtem komerčních produktů a jejich aplikace jsou zatím ve vodohospodářské praxi spíše ojedinělé. (Patera et al., 2002)

3.2 KRITÉRIA PRO VÝBĚR MODELŮ

Posouzení vhodnosti modelu pro simulaci příslušného procesu v příslušné lokalitě nespočívá jen na charakteristikách matematických formulací a na sledovaných parametrech spolehlivosti, citlivosti, příp. věrohodnosti modelu vyjádřených prostřednictvím statistických kritérií. Je třeba přihlédnout k řadě dalších okolností, kterými jsou například:

- dostupnost podkladů a datových zdrojů, potřebných pro sestavení a kalibraci modelu
- naplnění požadavků uživatelů na specifické funkce modelu a na jeho výstupy
- možnost náhradního odvození parametrů, kterými jsou např. geomorfologické charakteristiky povodí, bonita půd a způsob využití pozemků a rovněž další; náhradní odvození parametrů se často používá u srážko-odtokových modelů při chybějících pozorováních
- reference o uplatnění modelu v obdobných situacích, ve stejných klimatických oblastech nebo říčních systémech
- složitost ovládání modelu, uživatelské prostředí, vazby na databáze a na výstupy do technologií GIS, u předpovědních modelů vazba na radarová data
- možnost případné úpravy modelu pro specifické podmínky a předpoklady dalšího rozvoje modelu
- komerční dostupnost modelu a podmínky související s jeho úspěšnou instalací a provozem (obchodní cena softwarového produktu, náklady na další technologické podmínky jeho provozu, dodávka dokumentace, možnost školení)
- možnost personálního zabezpečení jeho odborné obsluhy

V matematických modelech se obecně vyskytuje mnoho parametrů, které jsou zatíženy určitou mírou nejistoty. Některé se ponechávají v modelech tak, jak byly naměřeny, jiné mohou být později upravovány kalibrací.

Při sestavovací fázi matematického modelu pro vybranou lokalitu spočívá výběr ve dvou zásadních rozhodnutích:

- na volbě kategorie modelu v závislosti na účelu, charakteristikách povodí, dostupných informací
- na kalibraci parametrů modelu

Je samozřejmé, že úspěšnost modelu v reálných podmínkách více či méně zkušeného uživatele závisí na dalších faktorech, které s vývojem modelu přímo nesouvisí. Jedná se především o kalibraci parametrů modelu. V případě deterministických modelů rozlišujeme dva typy parametrů:

- parametry fyzickogeografické, které představují fyzikálně stanovitelné veličiny povodí, říční sítě nebo vodohospodářské soustavy jako například plocha povodí, podíl nepropustných oblastí povodí, tvar koryta, jeho směrové poměry atp.
- parametry hydrologického procesu nejsou přímo měřitelné a jsou předmětem kalibrace, jako například výšky podpovrchových zón v koncepčních hydrologických modelech, hodnoty koncepční drsnosti v přirozených korytech

4 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MODELŮ

4.1 HYDRODYNAMICKÝ MODEL HEC-RAS

Model HEC-RAS (River Analysis System) je jedním z produktů, které v oblasti hydrologie a hydrauliky vyvinul Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers.

Program HEC-RAS využívá integrovaného prostředí MS Windows s grafickým uživatelským rozhraním (GUI) a podrobně řešenou hydraulikou ustáleného proudění v otevřených korytech a objektech na umělých i přirozených tocích (modul SNET).

4.1.1 Základní výpočetní schéma

Jedná se o matematický model, jehož základní výpočetní schéma je založeno na řešení známé metody na výpočet nerovnoměrného proudění vody v neprizmatických korytech známé jako metoda po úsecích. Hlavní předností programu je rozdělení profilu na vlastní koryto a levou či pravou inundaci. V případě řešení průběhu hladin a dalších veličin v zakřivených tratích program umožňuje počítat s různými vzdálenostmi mezi těmito částmi dvou sousedních údolních profilů.

Řešení vychází v každém profilu z jedné úrovně hladiny vody. Úroveň energetické čáry je dána přičtením střední rychlostní výšky získané jako průměr hodnot rychlostních výšek pro koryto a obě části inundace. Vzdálenost mezi profily je řešena váženým průměrem mezi 3 zadanými hodnotami.

Úroveň hladiny vody v profilech je vypočítávána od jednoho příčného řezu k následujícímu na základě bilance mechanické energie proudu, kterou lze napsat ve tvaru:

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

přičemž energetická ztráta h_e mezi dvěma příčnými řezy lze vyjádřit vztahem:

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

kde Z_1 , Z_2 je úroveň dna v korytě, Y_1 , Y_2 hloubka vody v příčném řezu, V_1 , V_2 průměrná rychlost, a_1 , a_2 rychlostní součinitel, g gravitační součinitel, L průtokové množství vážené délkou, SF je součinitel tření a C je ztrátový koeficient.

Program HEC-RAS umožňuje řešit hydraulickou funkci mostních a jezových objektů na toku. Objekty jsou přímo včleněny do základního výpočetního schématu. V tomto případě není nutné samostatně počítat jejich měrné křivky a ty následně vkládat do výpočtu ustáleného či neustáleného proudění. Je možné řešit i další hydraulické problémy spojené s funkcí mostních objektů, např. lze spočítat vliv ucpávání průtočného profilu mostu různými překážkami nebo potenciální tvorbu výmolů ve dně mostního profilu u břehových a středních pilířů.

Model a jeho výpočet je založen na následujících podkladech (Us Army Corps of Engineers):

- stavové veličiny
- parametry modelu
- počáteční a okrajové podmínky

4.1.2 Stavové veličiny

Základními veličinami, se kterými model počítá, jsou průtoky, hloubky, vodní stavy a rychlosti proudění. Jelikož se jedná o 1D model, je pro každý příčný řez udávána pouze jediná hodnota těchto veličin. Z těchto veličin dále program HEC-RAS z předepsaných algoritmů vypočítává další veličiny, které mohou být součástí výstupu. Těmito veličinami jsou například průtočné plochy, šířka příčného řezu v hladině a další.

4.1.3 Parametry modelu

Model používá parametry, které slouží k hydraulickému popisu koryta vodního toku. Mezi tyto parametry patří zejména drsnostní součinitel n podle Manninga, v případě koryt s hrubozrnným dnem lze využít i parametr k , který vyjadřuje parametr zrnitostního složení materiálu dna. Dalšími parametry koryta jsou topologie koryta, geometrie příčných řezů a parametrů objektů na toku.

4.1.4 Počáteční a okrajové podmínky

Program HEC-RAS vyžaduje k výpočtu ve všech bodech modelu určit stavové veličiny v okamžiku počátku výpočtu, zejména průtoku. Pro další výpočty používá program tzv. Restart („hot start“). Princip restartu spočívá ve využití vypočtených stavových hodnot v prvním kroku ke stanovení počáteční podmínky v následujícím kroku.

Formulace okrajových podmínek závisí na volbě režimu výpočtu. Při ustáleném proudění je v obou uzávěrových profilech říčního úseku volena jediná hodnota (hladina nebo průtok) případně jiná hydraulická podmínka.

4.1.5 Způsob zadávání vstupních dat

Program HEC-RAS nabízí více způsobů vkládání geodetických dat. Jednou z možností je import geodetických z textového souboru, ten však musí být vybaven speciálními hlavičkami a jeho příprava je poměrně náročná. Velkou výhodou programu je jeho plná kompatibilita s produkty pracujícími pod operačními systémy Windows, jako je například Excel. Mezi nimi lze velmi snadno přenášet veškerá data, především pak příčné profily. Kromě těchto možností existuje nadstavba HEC-GEORAS. Tento program pracuje nad GIS ArcView nebo ArcInfo a z digitálního modelu terénu sestavuje přímo geometrický model terénu.

Kromě základních dat určující příčný profil je možné vložit i polygonové body profilu v souřadném systému JTSK¹⁾, obdobně i polygon osy koryta v řešeném území. V tomto případě je program schopen stanovit i rozsah zátopového území v zadaných údolních profilech v souřadném systému JTSK¹⁾.

Dále tento program nabízí veliké možnosti v rámci editace dat příčného profilu. Provedení úprav do příčného profilu usnadní a zrychlí grafický editor příčného profilu. Důležitou funkcí je možnost vkládání neaktivních zón. Program v dané části průtočného profilu vykreslí případnou hladinu, ale nepočítá s průtočnou plochou do výpočtu.

4.1.6 Způsob prezentace výstupů

Výstupní data jsou základem prezentace výsledků modelu a proto velmi důležitá pro koncového uživatele modelu. Prostředky HEC-RAS mají vstupní i výstupní data dobře

¹⁾ JTSK je souřadný systém jednotné trigonometrické sítě katastrální.

prezentovaná v jiných systémech, například GIS, CAD, systémy Microsoft, nebo systémy HEC. Tyto data jsou grafická, tak tabelární.

U tabelárních výstupů si je možné nadefinovat tabulkovou sestavu dle potřeb prezentace, přičemž lze vybírat z více než 200 možných parametrů. Tabulky je možné tisknout přímo z programu nebo snadno přenášet do jiných programových produktů. Dále je možné prohlížet kompletní výsledky hydraulické funkce všech objektů na toku. Také je umožněno samostatně prohlížet a exportovat podrobné informace o jednotlivých profilech a objektech.

Grafické výstupy znázorňují vykreslení příčných a podélných profilů. Opět s možností přímého tisku nebo exportu do standardních formátů (Word, CAD). Dalším typem výstupů je textový soubor určený pro export dat do programů typu GIS, který obsahuje hranice zátopového území stanovené pomocí hydraulického výpočtu.

4.2 HYDRODYNAMICKÝ MODEL MIKE 11

MIKE 11 je profesionální prostředek pro numerickou simulaci procesů v říčních systémech a v povodí. Uvedený program představuje asi nejrozšířenější komerční 1D hydrodynamický model ve světovém měřítku. Jedná se o komplexní 1D simulační model modulární stavby pro simulace proudění, kvality vody a pohybu splavenin v otevřených korytech.

4.2.1 Základní výpočetní schéma

Základem modelu je hydrodynamický modul, simulující neustálené proudění v síti otevřených koryt, která může být větvená i okružová. Model používá metody konečných diferencí na síti vystřídáního typu, k popisu koryta se používá sada příčných profilů obecného tvaru.

Model umožňuje řešit říční i bystrinné proudění. V rámci vnitřních okrajových podmínek lze modelovat některé základní typy objektů – objekty obecně popsané konsumpční křivkou²⁾, přepad přes širokou korunu, propustek, přepad přes pohyblivý jez apod. Doplnkový modul umožňuje simulovat porušení hráze a další havarijní stavy, které slouží jako podklad pro simulaci průlomové vlny.

²⁾ Konsumpční křivka znázorňuje vztah mezi průtokem a vodním stavem na určitém měrném profilu vodního toku.

Další moduly umožňují řešit transportní procesy a problematiku související s kvalitou vody (pohyb znečišťujících látek různého druhu, pohyb soudržných a nesoudržných splavenin, kyslíková bilance, eutrofizace³⁾, těžké kovy apod.).

4.3 HYDRODYNAMICKÝ MODEL HYDROCHECK

HYDROCHECK představuje programový komplet, který je vyvíjen od roku 1990 ve spolupráci státního podniku Povodí Ohře a vodohospodářskou firmou Hydrossoft Veleslavín. Tento komplet se skládá ze tří volně spolupracujících programů pro výpočty proudění.

4.3.1 HYDROCHECK 1

HYDROCHECK1 řeší ustálené rovnoměrné a nerovnoměrné proudění (říční i bystřinné) v obecném korytě s možností rozdělení profilu na dílčí sekce s rozdílnými charakteristikami proudění. V kynetě⁴⁾ se do omočeného obvodu započítávají obě fiktivní svislice (s možností zadání náhradní drsnosti vody), u dílčích segmentů ležících od kynety⁴⁾ nalevo, se do omočeného započítávají pouze levostranné fiktivní svislice a na pravé straně od kynety⁴⁾ pouze pravostranné svislice.

Jednou z hlavních hydraulických výhod programu HYDROCHECK 1 je možnost jednoduchého rozdělení profilu na dílčí sekce, zejména podle tvaru koryta nebo u mělkých profilů i podle změn drsností. Tento způsob výpočtu odstraňuje nepřirozené deformace konsumpčních křivek²⁾ a křivek rychlostí, způsobené náhlým nárůstem hodnoty omočeného obvodu v úrovni vylití vody do inundací a potlačuje deformace výsledků při průměrování výrazně proměnlivých drsností v příčných profilech. Dílčí výsledky v jednotlivých sekcích příčného profilu jsou do základní výpočtové rovnice „metoda po úsecích“ váženy přes modul průtoku (výpočet kritické hloubky, ztráty třením atd.) a tím umožňují výsledky bližší realitě.

4.3.2 HYDROCHECK 2

HYDROCHECK 2 řeší výpočty konsumpčních křivek²⁾ objektů na toku. Obsahuje výpočty jezových těles obecných, pohyblivých, se zaoblenou korunou, proudnicové plochy a dále širokou

³⁾ Eutrofizace je proces obohacování vod o živiny, zejména o dusík a fosfor.

⁴⁾ Kyneta představuje prohloubenou a trvale zaplavovanou část vodního koryta. Další částí koryta je berma, což je část zaplavovaná jen při vyšším průtoku.

korunu, výtok otvorem. Je s ním tedy možné řešit i mostní objekty s říčním prouděním v korytě nad objektem a kombinací objektů přelévané mosty apod. Pro výpočty je použita „proužková“ metoda, vyvinutá ve firmě Hydrossoft Veleslavín.

4.3.3 HYDROCHECK 3

Program řeší výpočet časově neustáleného proudění ve větveném systému otevřených koryt s říčním prouděním s možností využití různých typů časově závislých i nezávislých okrajových podmínek. Typickou časově závislou okrajovou podmínkou je časový průběh vypouštění významného průtoku do koryta nebo časový průběh manipulace s hladinou, typickou časově nezávislou okrajovou podmínkou je konsumpční křivka²⁾ objektu. Základním výstupem jsou průběhy hladin, průtoků a rychlostí v jednotlivých časových krocích.

HYDROCHECK 3 se skládá ze tří samostatných programů. První z nich slouží k přípravě úlohy (lze pracovat s tratí vytvořenou v programu HYDROCHECK 1), druhý k vlastnímu výpočtu a třetí k presentaci výsledků. Program je pro přípravu úlohy vybaven stejným uživatelským prostředím jako HYDROCHECK 1 a 2.

Výpočtový program poskytuje průběžnou grafickou kontrolu výpočtu a možnost podle potřeby za běhu měnit některé jeho základní parametry. Presentační program umožňuje z uložených výsledků provádět krokovou i plynulou animaci vypočtené situace v podélném profilu a také zobrazovat časové průběhy veličin v určených profilech.

Program HYDROCHECK 3 byl vytvořen pro výpočty optimalizace plavebních stupňů, dnes se po úpravě iteračních algoritmů používá zejména pro modelování korytových průtoků. (Patera et al., 2002)

4.3.4 Vstupní a výstupní parametry modelu

Základními vstupními parametry jsou příčný profil a konsumpční křivka²⁾, které jsou společné a volně přenositelné mezi všemi třemi programy řady HYDROCHECK. Programy jsou vybaveny shodným uživatelským prostředím, což usnadňuje zvládnutí jejich obsluhy.

Programy HYDROCHECK jsou dále schopny načítat libovolné textové soubory s různým pořadím sloupců oddělené tabelátorem nebo mezerou. Osvědčenou metodou v programech HYDROCHECK je načítání příčných profilů přímo z programů GIS s vykreslenými geodeticky zaměřenými body nad mapovým podkladem (např. JTSK¹⁾). Vzhledem k možnosti automatického třídění a vodohospodářem řízené transformaci do jednorozměrného modelu

mohou být geodetická zaměření jednotlivých bodů prováděna podle reálné situace v terénu (lomené profily) a v libovolném pořadí. V případě uzavřených profilů nebo u zaměření podemletých břehů lze výsledky automatického třídění jednoduše upravit.

Výsledky výpočtů jsou zapisovány do vyhrazených textových souborů, jejichž editaci pomocí externího editoru je možné provádět přímo z prostředí programu. Programy zobrazují výsledky v grafické podobě, v případě programu HYDROCHECK 1 lze exportovat situaci, podélný profil a příčné profily ve formátu DXF (Autocad, Microstation apod.). Programy jsou vybaveny prostředky pro import dat z textového formátu a bohatými možnostmi pro editaci úloh.

4.4 HYDROLOGICKÝ MODEL HEC-HMS

HEC-HMS je hydrologický model pro simulaci srážko-odtokového procesu, který je nástupcem modelu HEC-1. Jedná se o produkt Hydrologic Engineering Center a v současnosti je samostatný model k dispozici ve verzi 3.1.0., která nabízí pokročilé uživatelské rozhraní velkou flexibilitu při zadávání vstupních parametrů.

4.4.1 Základní výpočetní schéma

Uvedený model obsahuje tři základní části:

- model povodí
- srážkový model
- kontrolní specifikace – definuje se počátek, konec a časový krok simulace

V případě, že jsou k dispozici měřená data lze využít optimalizace parametrů výpočtu.

Editor modelu povodí umožňuje z jednotlivých úseků (podpovodí, soutok, přímý úsek, rozdělení, nádrž atd.) sestavit strukturu konkrétního zájmového povodí. Vstupní a výstupní parametry jsou zadávány a následně i vypočteny pro každý úsek povodí. Základním vstupním parametrem modelu povodí je plocha povodí.

Program HEC-HMS nabízí široký výběr metodik pro stanovení ztráty na povodí a efektivní srážky (SCS CN, Green and Amp, SMA), hydrologickou transformaci (jednotkové hydrogramy⁵⁾ různých typů, kinematická vlnová aproximace 2D), pohyb v korytech (lag metoda, Muskingum-Cunge, kinematická vlnová aproximace) a základní odtok (recesní metoda, metoda lineární nádrže, sezónní konstanty). Model umožňuje zahrnutí evapotranspirace a tání sněhu

⁵⁾ Hydrogram představuje grafické znázornění závislosti průtoku na čase (= čára průtoků).

(nejrozšířenější metoda stupeň/den). Nespornou výhodou je možnost kombinace těchto metodik v rámci jednoho schematizovaného povodí.

Dále srážkový model obsahuje informace potřebné k definování návrhových dešťů (historických, blokových, syntetických) ale ne pro podmínky ČR. Při používání v podmínkách ČR je nutné zadat návrhový déšť formou hyetogramu⁶⁾.

4.4.2 Výstupní parametry modelu

Výstupními parametry modelu jsou především charakteristiky hydrogramu⁵⁾ v podobě grafické i tabelární. Mezi charakteristiky hydrogramu⁵⁾ patří výška odtoku, kulminační průtok a doba jeho dosažení, objem přímého a základního odtoku a průběh hydrogramu⁵⁾.

4.5 HYDROLOGICKÝ MODEL DESQ – MAXQ

První programová verze modelu byla zpracována ve spolupráci s firmou Aqualogic, Software Development and Consulting Praha v roce 1997. Model DesQ byl postupně upravován až do verze DesQ – MaxQ v5.0 a ověřován porovnáním vypočtených hodnot charakteristik povodňových vln pro 11 povodí různého charakteru s údaji ČHMÚ. Tato nová verze programu byla zpracována se zohledněním připomínek uživatelů modelu DesQ verze 4.1. (Roub, 2004).

4.5.1 Základní výpočetní schéma

Model je využitelný pro výpočet maximálního průtoku z povodí, které lze schematizovat buď jednou odtokovou plochou (svah) nebo tzv. modelovým povodím ve tvaru „otevřené knihy“, bez zohlednění rozvinuté hydrografické sítě v povodí. Při rozvinutější hydrografické síti v povodí lze schematizovat povodí více modelovými povodími, maximální průtok se odvozuje modelem DesQ-MaxQ v kombinaci s jinými hydraulickými modely neustáleného proudění v říční síti, např. HEC-RAS.

4.5.2 Vstupní a výstupní parametry modelu

Model DesQ – MaQ je vhodným nástrojem pro odvozování charakteristik povodňových vln pro velmi malá povodí, bez hydrometrických pozorování, model nevyžaduje kalibraci vstupních

⁶⁾ Hyetogram znázorňuje časové rozložení intenzit deště.

parametrů, umožňuje i výpočet charakteristik povodňových vln ovlivněných antropogenními zásahy.

Představovaný model umožňuje tyto výpočty:

- výpočet maximálních N-letých (návrhových) průtoků a objemů povodňových vln, vyvolaných přívalovými dešti kritické doby trvání
- výpočet maximálních průtoků a objemů povodňových vln, vyvolaných dešti zadané doby trvání, a příslušné náhradní intenzity
- výpočet maximálních průtoků a objemů povodňových vln, vyvolaných dešti zadané doby trvání a intenzity.
- odvození tvaru povodňových vln (časové řady)
- výpočet charakteristik hydrografů, ovlivněných antropogenní činností v povodí (změna ve způsobu využití pozemků v povodí, rozšíření zpevněných ploch v povodí urbanizací aj.).

5. PODKLADOVÁ DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

V následující kapitole jsou charakterizovány pokladová data a metodické postupy, které jsou obecně využívány při řešení úkolů matematického modelování proudění vody.

V současné době neexistuje v ČR kvalitní a dostatečně podrobný mapový podklad, který by vhodně vyjadřoval příčný profil koryta v celé délce sledovaného vodního toku pro užití v hydrodynamických modelech.

Výškopisná data jsou rozhodující i při samotné volbě hydrodynamického modelu pro prováděné simulace (Drbal et al., 2009). Méně náročnými modely z hlediska výškopisu území jsou 1D modely, kterým pro výpočet postačí příčné profily koryta a přilehlé inundace. V případě 2D modelů je pro výpočet již vyžadující detailní digitální model reliéfu (dále DMR), který přesně vystihuje morfologii sledovaného území (Cobby et al., 2001). Navíc 1D modely umožňují také schematizaci podélných a příčných technických objektů v korytech, která není u 2D modelů ještě plně možná. Na základě požadavků vstupních dat 1D a 2D modelů se odvíjí i finanční náročnost na pořízení těchto dat (Valentová et al., 2010).

5.1 GEODETICKÉ ZAMĚŘENÍ

Geodetické zaměření představuje měření bodových polí v terénu, koryto a inundace, pomocí elektrooptických přístrojů (např. totální geodetická stanice), které bývá časově i finančně nejnáročnějším způsobem s ohledem na velikost zaměřeného bodového pole. Maximální vzdálenosti mezi jednotlivými příčnými profily se obecně pohybují v rozsahu od několika desítek metrů až po stovky metrů s ohledem na variabilitu tvaru říčního koryta (Merwade et al., 2006). Standardní vzdálenost příčných profilů se pohybuje v intervalu od 50 m až do 100 m v intravilánu a 200 až 400 m v extravilánu. Důležitou podmínkou při prováděném zaměření je, aby zaměřením byla co nejdůležitěji zachycena prostorová variabilita vodního toku a byly zachyceny všechny významné změny v geometrii koryta (změny příčného průřezu koryta, změny podélného sklonu apod.) (Ramsankaran et al., 2010).

5.2 FOTOGRAMMETRIE

Letecká fotogrammetrie se používá pro sběr polohopisných a výškopisných dat ve velkých a středních měřítkách s dostatečnou přesností a s výrazně nižšími náklady než při použití geodetických metod. Využívá dvou vhodně pořízených snímků (stereofotogrammetrie), které zobrazují stejné území s určitým překryvem. Obvyklá forma DMR je v případě letecké fotogrammetrie tvořena základní vrstvou 3D bodů, která je doplněna vyhodnocením významných terénních hran v podobě 3D linií (Merwade et al., 2008). Maximální krok rastru bodů by neměl překročit hodnotu 25 metrů (optimální hodnota činí 10 až 15 m), vyhodnoceny musí být veškeré terénní hrany a lomy, jejichž relativní výška je větší než 25 cm. Požadovaná přesnost je definována maximální polohovou odchylkou 0,5 m a střední výškovou chybou 0,11 m (Dolanský, 2004).

S ohledem na růst vegetace je vhodné snímkování provádět v období březen až duben a říjen až listopad. Nízká časová náročnost oproti standardnímu geodetickému měření umožňuje častější opakování a tím i udržování aktuálnosti dat (Metodický pokyn, 28181/2005-16000).

5.3 LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ (LLS)

Letecké laserové skenování (dále LLS) povrchu patří k nejmodernějším technologiím pro pořizování prostorových geografických dat (Dolanský, 2004). Metoda LLS, případně také Lidar (Light Detection and Ranging), je založena na principu odrazu laserových paprsků, které interpretují obraz měřených objektů jako mračno bodů. Laserovému paprsku, který je vyslán směrem k povrchu se změří vzdálenost, kterou urazí směrem k povrchu měřeného území nebo objektu. GPS ve spolupráci s inerciální navigací určí směr paprsku. Zpracováním těchto parametrů dojde k výpočtu polohy daného bodu (Webe et Lohr, 1999; Plate, 2002; Dolanský, 2004; Novák et al., 2011; Oršulák et Pacina, 2012). Dílčím výstupem laserového skenování je soubor 3D souřadnic odražených bodů – takzvané mračno bodů. Na základě dalších informací o odraženém bodu - např. intenzitě odrazu může být provedena tzv. klasifikace. Takto získané mračno bodu je možné reklasifikovat do 3 (4) základních skupin – teren, vegetace, zástavba, (chyby) (Dolanský, 2004; Oršulák et Pacina, 2012).

Metoda LLS umožňuje obecně získávání velkého objemu dat v krátkém časovém intervalu. Ve spojení s poměrně vysokým stupněm automatizace zpracování dat při vytváření

DMR či DMP představuje jednu z nejefektivnějších metod pro získávání prostorových dat (Dušánek, 2008).

Pro využití ve vodním hospodářství je problematické chování laserového paprsku z infračerveného spektra, vzhledem ke skutečnosti, že voda toto záření pohlcuje (Podhoranyi et Fedorcak, 2014). Vodní plochy se pak v datech jeví jako oblasti s velmi nízkou hustotou bodů, přibližnou výšku hladiny je nutné interpolovat podle výšek bodů odražených od břehů (Roub et al., 2012). Jak upozorňuje Aggett et Wilson (2009) ex Fowler (2001), interpolací se mohou do modelu zanést další nepřesnosti v podobě ztráty informace o hranicích (např. břehové linie).

V současné době probíhá v České republice (ČR) nové výškopisné mapování metodou LLS, která navazuje na současné výškopisné databáze, jež jsou v určitých územních typech již zastaralé a přesností a kvalitou negativně ovlivňují kvalitu státních mapových děl i digitálních geografických databází ČR (Brázdil, 2009). Cílem je ve spolupráci s Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK), Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem obrany zajistit kvalitní geografickou datovou infrastrukturu, jednotnou a standardizovanou pro celé území ČR.

Dušánek (2010) definuje plánované produkty z tvorby nového výškopisu ČR, které vzniknou po zpracování dat v různých časových obdobích a budou jimi digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G) ve formě mřížky 5 x 5 m, digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN), digitální model povrchu 1. generace (DMP 1G) ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN).

Po zpracování dat LLS byly vytvořeny tři realizační produkty (ČÚZK, 2015a,b,c):

- Digitální model reliéfu území České republiky 4. generace (DMR 4G) ve formě mřížky (GRID) 5 x 5 m s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu - současně dostupný pro celé území ČR.
- Digitální model reliéfu území České republiky 5. generace (DMR 5G) ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu - předpokládaný termín vyhotovení pro celé území ČR je konec roku 2015.
- Digitální model povrchu území České republiky 1. generace (DMP 1G) ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky

rostlinného půdního krytu) - předpokládaný termín vyhotovení pro cele území ČR je konec roku 2015.

Mapování pomocí LLS přineslo výrazné zpřesnění polohopisných dat oproti dosavadním. Vzhledem k dobré rozpoznatelnosti koryt toku v datech LLS bylo možné zjistit, že rozdíl v přesnosti činí místy až 20 m (Uhlířová et Zbořil, 2009).

5.4 HYDROLOGICKÉ MĚŘENÍ

Hydrologické měření představuje druhou složku technického řešení schematizace vodního toku pro matematické modely. Hydrologické měření je v ČR v kompetenci Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a podniků povodí. Hydrologický monitoring je možné rozdělit do dvou odlišných složek, které ovšem spolu úzce souvisí a vzájemně se ovlivňují. První složkou je kvalitativní monitoring, který ovšem není uplatnitelný z hlediska schematizace vodního toku pro hydrodynamický model. Druhou složkou, která je již uvažována pro uplatnění při tvorbě geometrie do hydrodynamického modelu, je kvantitativní monitoring. Kvantitativní monitoring povrchových vod zahrnuje monitoring vodních toků a vybraných vodních útvarů stojatých vod, přičemž z hlediska využitelnosti pro matematický model je podstatné měření na vodních tocích.

I když drobné toky představují větší část hydrografické sítě ČR (78% celkové délky), jsou pro ně jen výjimečně k dispozici soustavná hydrologická pozorování (Hrádek et Sobota, 1999), což je nicméně s ohledem na možnost uplatnění hypotézy o syntéze dat LLS s daty z hydrologického měření pozitivní, poněvadž jsou hydrologická pozorování soustředěna především na významné vodní toky, na kterých je možné použití syntézy dat aplikovat.

Rozsah monitorovací sítě vodních toků nepokrývá všechny vodní útvary povrchových vod, kterých je v ČR navrženo 1070, a ani v dohledné budoucnosti není její rozšíření na všechny vodní útvary reálné. Struktura této sítě však pokrývá významné vodní toky a jejich povodí tak, aby za pomoci hydrologické analogie (Hladný, 2002; Giannoni et al., 2003; Fowler et al., 2005) umožňovala zpracování hydrologických charakteristik pro libovolné místo v říční síti. Na území ČR je v současnosti v provozu cca 494 stanic s hydrologickým měřením na významných vodních tocích.

Ve vazbě na prováděné nové výškopisné mapování ČR technologií LLS a s ohledem na prováděné hydrologické měření ČHMÚ a podniky povodí je alternativně možná možnost syntézy

těchto dat pro tvorbu schematizace vodního toku pro hydrodynamický model, kdy je v rámci technického řešení originálním způsobem zkombinována informace o hodnotě stanovených průtoků v době pořizování výškopisných dat metodou LLS se samotnými daty LLS.

6. VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

- I. Lávičková M. et Roub R., 2010: Využití matematického modelu pro posouzení navržených protipovodňových opatření v lukách u Příchovic. VTEI I/2010 (52): 26-28. ISSN 0322-8916.

- II. Kurková M., Roub R. et Smolík J., 2012: Využití matematického modelu pro hydrotechnické posouzení vodních toků v katastrálním území obce Mochtín. VTEI 2/2012 (54): 9-12. ISSN 0322-8916

- III. Roub R., Kurková M., Hejduk T., Bureš L. et Novák P., 2015: Comparing a hydrodynamic model from 5th generation DRM data and a model from data modified by means of crosolver tool.

Příspěvek je přijat do recenzního řízení v AUC Geografica.

6.1 ČLÁNEK I.

Lávičková M. et Roub R., 2010.

Využití matematického modelu pro posouzení navržených protipovodňových opatření v lukách u Příchovic.

VTEI I/2010 (52): 26-28. ISSN 0322-8916.

VYUŽITÍ MATEMATICKÉHO MODELU PRO POSOUZENÍ NAVRŽENÝCH PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ V LUKÁCH U PŘÍCHOVIC

Marie Lávičková, Radek Roub

Klíčová slova

povodně – protipovodňová ochrana – matematický model – Hec-Ras

Souhrn

Zájmové území se nachází na části vodního toku Úhlavy v lukách u Příchovic v blízkosti města Přeštice. Návrh protipovodňových opatření je součástí dokumentace k územnímu řízení: Přeštice – Inundační průlehové koryto v lukách u Příchovic. Posuzovaná dokumentace byla zhotovena na základě hydrotechnických výpočtů a zkušeností z povodně v srpnu 2002.

Matematický model je prakticky využit ve studii posouzení navržených protipovodňových opatření na vodním toku Úhlavy ve městě Přeštice. Posouzení je založeno na matematickém modelování odtokového a hladinového režimu na vodním toku Úhlavy. K vlastní simulaci je použit nekomerční software Hec-Ras, verze 3.1.1. Z provedeného posouzení navržených protipovodňových opatření by mělo být zřejmé, zda jsou navržena efektivně. Matematický model připravený pomocí uvedeného softwaru je možné využít jako podklad pro poskytnutí podpory při realizaci navržených protipovodňových opatření na vodním toku Úhlavy v lukách u Příchovic v rámci dotačního programu „Podpora prevence před povodněmi II“ v gesci Ministerstva zemědělství.

Úvod

Město Přeštice se nachází v Plzeňském kraji asi 15 km jižně od Plzně v údolní nivě vodního toku Úhlavy. Řeka zde protéká asi 600 m širokým údolím, které je tvořeno převážně lučními pozemky a pastvinami.

Vodní tok Úhlavy v Přeštích způsobuje záplavy již při dvouleté povodni. Protipovodňová opatření byla navržena s ohledem na realizované úpravy v letech 2005 a 2006 u silničního mostu na Nepomuk přes Úhlavu v ř. km 31,336. Úpravy byly provedeny za účelem zkapacitnění inundačních polí níže pod mostem. Jednalo se o snížení terénu na nejvyšší možnou výšku světlosti mostních otvorů.

Návrh protipovodňových opatření

Navrhovaná opatření jsou situována v úseku ř. km cca 31,3–33,3. Cílem navržených protipovodňových opatření by měla být ochrana spodní části Přeštic před účinky velkých vod. Návrh protipovodňových opatření je založen na odvedení hlavního proudu aktivní inundace mimo město do luk, což by mělo zmírnit následky při zvýšení hladiny za povodně. Efekt spočívá v rozdělení průtoků za povodně, která protéká v inundaci luk [1]. Návrh protipovodňových opatření se skládá ze čtyř stavebních objektů, jak je znázorněno na obr. 1.

Objekt SO-01 Inundační koryto I

Koryto I bude vytvořeno v délce 502 m v úseku od chodníku pro pěší do Příchovic až do konklávního břehu prvního meandru v lukách. Koryto bude mít šířku 60–75 m a bude ploché, s hloubkou do 40 cm. Plochý tvar bude opevněn ohumusováním a podloženou protierozní rohoží. Koryto bude ústít do toku v rozvinutí do šířky 60 cm, kde se provede opevnění nátoky a břehů kamennou patkou a rovininou z lomového kamene.

Objekt SO-02 Inundační koryto II

Koryto II bude vytvořeno v délce 75 m na již existujícím meandru toku nad korytem objektu SO-01. Koryto bude mít šířku 50–20 m. Dno koryta bude ploché, s hloubkou do 40 cm. Koryto bude ústít do toku v rozvinutí do šířky 60 cm, kde se také provede opevnění nátoky a břehů kamennou patkou a rovininou z lomového kamene.

Objekt SO-03 Ponořený prah v ř. km 33,133

Ponořený prah bude umístěn napříč tokem v jeho směrovém ohybu do úrovně 60 cm pod současnou hladinu danou výší koruny jezu. Jeho konstrukce v toku, která bude plně zatopena, bude z těžkého záhozu z lomového kamene. Celý objekt bude mít zúženou vstupní šířku ze současné šířky vodní hladiny 19 m na 15 m. Ohraničení bude provedeno ocelovými štetovými stěnami, které budou dostatečně zavázány do ochranných hrázek

na levém i pravém břehu. Pro opevnění celé konstrukce bude použito těžkého kamenného záhozu a kamenné rovinaniny. Současně budou zpevněny břehy toku pod i nad ponořeným prahem.

Objekt SO-04 Ochranná hráz

Ochranná hráz se vybuduje v určené poloze v parametrech lichoběžníkového profilu v km 0,0–0,5, kde bude sloužit jako příjezd do zahrádkářské kolonie a současně plnit funkci cyklostezky. Bude mít šířku v koruně 4 m a průměrná výška bude nad 0,7 m. Sklony svahů budou do luk 1 : 3 a směrem k zahrádkám 12 % pro sjezd. V km 0,5–1,215 na pravém břehu bude mít hráz šířku v koruně 2,5 m a sklony obou svahů budou ploché 1 : 4,5–5. Výška hráze bude 1,2–1,5 m.

Svahy budou osety s ohumusováním na vrstvě ornice. Těleso hráze bude tvořeno hutněnými násypy výkopové zeminy získané při budování inundačních koryt, popř. při prohlubování koryta Úhlavy. Čelo hráze v km 1,195–1,215 bude v celém obvodu líce opevněno kamennou rovininou na sucho.

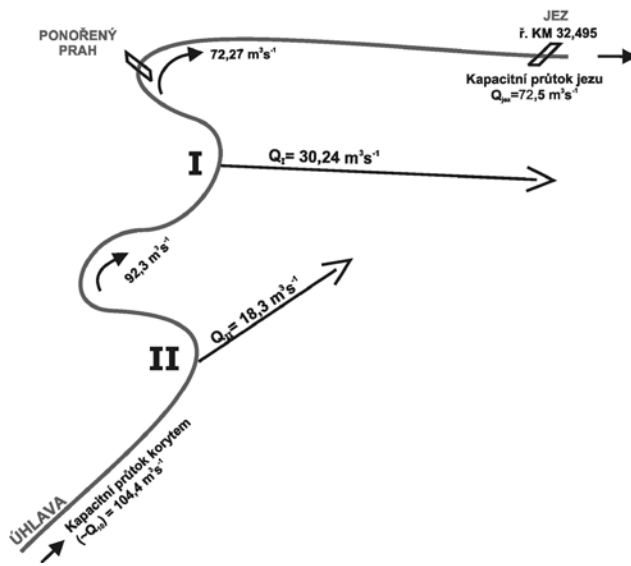
Hydrotechnické posouzení návrhu

Software HEC-RAS (River Analysis System) je jedním z produktů, které v oblasti hydrologie a hydrauliky vyvinul Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. Jde o jednorozměrný model (1D), který umožňuje řešení proudění v otevřených korytech včetně analýzy vlivu nejrůznějších typů objektů (jezy, mosty, propustky, splavy). Modelované území je popsáno soustavou příčných profilů a popřípadě objektů, přičemž se předpokládá, že proudění se děje ve směru spojnic mezi jednotlivými profily [2].

Matematický model byl využit pro posouzení návrhu protipovodňových opatření v zájmovém území. Pomocí modelu bylo stanoveno, jak ovlivní danou lokalitu vybudování protipovodňových opatření při průchodu jednotlivých N-letých průtoků ($Q_{1'}$, $Q_{2'}$, $Q_{5'}$, $Q_{10'}$, $Q_{20'}$, $Q_{50'}$, Q_{100} a návrhové Q) posuzovaným



Obr. 1. Návrh protipovodňových opatření



Obr. 2. Grafické znázornění rozdělení průtoků v Úhlavě pro variantu A

územím. Pro posouzení návrhu protipovodňových opatření byly vypočítány dvě varianty.

Varianta A je založena na rozdělení průtoků v zájmovém území (obr. 2 a 3). Průtoky do inundačních koryt byly zadány podle návrhu, který předpokládá, že průtok do inundačního koryta SO-01 by měl být $30,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a průtok do inundačního koryta SO-02 by měl být $18,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Uvedené průtoky do inundačních koryt jsou předpokládány při průchodu kapacitního průtoku korytem.

Varianta B je odlišná ve způsobu schematizace zájmového území, zadávání geometrických dat a okrajových podmínek, především co se týká rozdělení průtoků.

V modelu varianty B byla provedena schematizace pouze hlavního toku Úhlavy. Okolní posuzovaná oblast nebyla přímo rozdělena na jednotlivé objekty (obr. 4). Nadmořské výšky okolní oblasti podél Úhlavy zůstaly zachované podle návrhu, to znamená, že geometrická data byla shodná s variantou A.

Okrajové podmínky varianty B byly opět nastaveny pro osm různých N-letých průtoků. V tomto řešení, kde byla provedena zjednodušená schematizace návrhu, již nebylo uvažováno rozdělení průtoků do inundačních koryt v posuzované lokalitě, a proto byl volen jen počáteční průtok na toku Úhlavy pro jednotlivé N-leté průtoky. V tomto řešení také došlo k rozšíření posuzované přílehlé oblasti podél vodního toku Úhlavy.

Výsledky a diskuse

Hydrotechnické posouzení navržených protipovodňových opatření bylo provedeno při průchodu N-letých průtoků (tabulka 1) zájmovým územím vodního toku Úhlavy v lukách u Příchovic.

Výsledkem posouzení jsou záplavové čáry pro realizaci protipovodňových opatření, a tím vymezení záplavových území pro jednotlivé N-leté průtoky.

Výstupy varianty A

Výstupem řešení varianty A je znázornění celkového pohledu rozlivu při průchodu povodní posuzovaným územím (obr. 5).

Výsledky matematického modelu ukázaly, že v případě průběhu jednotlivých N-letých průtoků posuzovaným územím a za předpokladu rozdělení průtoků podle návrhu by protipovodňová opatření byla účinná. Voda by byla zadržena v inundačním území prostřednictvím koryt a ochrannou hrází. K rozlivu vody do území by docházelo v přílehlé oblasti koryta Úhlavy. Za této situace by nedošlo po celé délce ochranné hráže k přelití vody zpět do vodního toku Úhlavy.

Dalším ukazatelem účinnosti protipovodňových opatření je stav a výška hladiny vody při průběhu N-letých povodní na objektu SO-04, na ponořeném prahu. Kóta koruny hráže ponořeného prahu je navrhována ve výšce $353,00 \text{ m n.m.}$ Tímto profilem je možné propustit při hladině průtoku N-leté povodně do koryta pod tento prah pouze množství cca $72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Toto množství vody je schopen převést přes pevnou korunu jez v ř. km $32,495$ bez následků pro vlastní město.

Z výstupu modelu je patrné, že dojde k překročení maximálního možného průtočného množství na objektu při Q_{100} a vyšším, a tím dojde pravděpodobně k vylití vody z břehů na dolním jezu v ř. km $32,495$ a k ohrožení nejbližší okolní části města.

Výstupy varianty B

Výsledky z modelu varianty B mají upřesnit a doplnit výsledky z varianty A. Jde především o výšky hladin vody při průchodu jednotlivých povodňových vln posuzovaným územím. Tato varianta dává přesnější údaje o stavu a výšce hladiny vody při povodni. Je to způsobeno tím, že řešení povodní není založeno na přímém rozdělení průtoků do inundačních koryt.

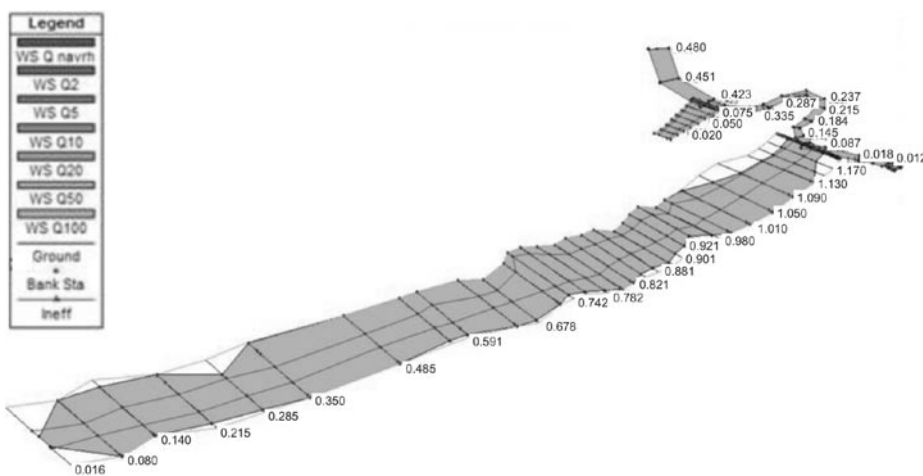
Z výstupů této varianty vyplývá, že v případě průchodu průtočného objemu Q_1, Q_2, Q_5 a Q_{10} by nemělo dojít k vylití vody z břehů inundačních koryt. V případě průběhu průtočného množství Q_{20} by mělo dojít k vylití vody



Obr. 3. Varianta A – znázornění příčných profilů v zájmovém území



Obr. 4. Varianta B – znázornění příčných profilů v zájmovém území



Obr. 5. Rozliv povodně po realizaci protipovodňových opatření

Tabulka 1. Hodnoty průtočných objemů odpovídající N-letým průtokům a pro návrhové Q

N-leté průtoky [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]								
N	1	2	5	10	20	50	100	návrh
Průtok	38,3	57,1	86,6	112	141	183	219	250

z břehů inundačních koryt do přilehlé oblasti, ale neměla by nastat situace zpětného přelití vody přes ochrannou hráz do vodního toku Úhlavy po celé její délce. Během průběhu vyšších průtočných množství, než je Q_{20} , dojde v zájmovém území k vylití vody z břehů inundačních koryt a nastane i přelití přes ochrannou hráz zpět do toku Úhlavy, což způsobí zaplavení okolní přilehlé oblasti a ohrožení města.

Varianta B též poskytla údaje o stavu a výšce hladiny vody při průběhu N-letých povodní na ponořeném prahu na vodním toku Úhlavy. Z výstupu modelu je patrné, že dojde k překročení maximálního možného průtočného množství na objektu při Q_{20} a vyšším, a tím dojde pravděpodobně k vylití vody z břehů na dolním jezu v ř. km 32,495 a k ohrožení nejbližší okolní části města. Stav hladiny při průběhu průtočného množství Q_{100} bude překročen téměř o 1,2 m, než je navrhovaná kóta koruny hráze objektu. Výška hladiny na ponořeném prahu s předchozí variantou výsledku se liší o 1,1 m.

Shrnutí

Na základě výsledků matematických modelů v programu HEC-RAS byly vytvořeny mapy záplavového území pro jednotlivé N-leté průtoky (obr. 6).

Podle výsledků lze konstatovat, že navržená protipovodňová opatření by měla být účinná proti Q_{20} . Povodně většího průtočného objemu vody než Q_{20} budou způsobovat záplavy a povodňové škody v přilehlých oblastech toku Úhlavy a v dolní okrajové části města Přeštice. Dále záplavové čáry, především pro Q_{50} a Q_{100} , by po realizaci navržených protipovodňových opatření byly posunuty blíže k vodnímu toku Úhlavy, a tím by došlo ke zmenšení záplavových území.

Závěr

Současný stav ochrany před povodněmi je do jisté míry v České republice ovlivněn skutečností, že před rokem 1997 nebylo naše území poměrně dlouho postiženo povodní se skutečně katastrofálními následky na větší části území republiky. Tím došlo k podcenění nebezpečí vyplývajícího z možných povodní a toto podvědomí vedlo jednak ke zvýšení rizika škod při využívání území v údolních nivách a jednak k oslabení významu budování dalších preventivních opatření na ochranu před povodněmi. Prakticky úplně byly potlačeny možnosti využít netechnická preventivní opatření.

K největším nedostatkům v preventivní ochraně před povodněmi patří skutečnost, že záplavová území byla stanovena pouze podél malé části délky významných vodních toků. Podobně i komplexní systémový přístup k návrhům a realizaci preventivních technických a netechnických opatření nebyl prakticky uplatňován. Z tohoto důvodu jsou od roku 1998 za výrazné zahraniční spolupráce a pomoci zaváděny moderní metody matematického modelování povodňových vln a jejich průběhu s možností ověřovat nejen rozsah záplav, ale rovněž posuzovat účinnost uvažovaných opatření na ochranu.

S ohledem na zavádění moderních metod v hydrologii bylo potřeba provést posouzení navržených protipovodňových opatření také matematickým modelem.

Pomocí matematických modelů lze provádět řadu simulací proudící vody v průběhu povodní s kulminačními průtoky odpovídajícími N-letým vodám. Dále dokážou vyladit odtokové a hladinové poměry posuzované oblasti, např. průběh hladin, hloubek a velikost rychlostí proudící vody. Modely poskytují přehledné informace o charakteristickém proudění v libovolném místě modelové oblasti a umožňují provedení kvalifikované analýzy hydrologických poměrů v inundačním území při povodňových situacích.

Na základě výsledků je možné doporučit matematický model jako vhodný nástroj pro posouzení protipovodňových opatření na vodních tocích. Protipovodňová opatření jsou navržena podle posouzení proti průtočnému objemu vody Q_{20} .

Stupeň povodňové ochrany navržených protipovodňových opatření podle hydraulického posouzení je v souladu s Koncepcí ochrany vod Plzeňského kraje vzhledem k tomu, že navržená protipovodňová opatření v lukách u Příchovic mají za cíl ochránit spodní část města Přeštice, kde se nachází rozptýlená zástavba a zahrádkářská kolonie určená pro rekreační účely.

Dalším důvodem pro realizaci navržených protipovodňových opatření je zařazení města Přeštice a obce Příchovice do I. kategorie priorit realizace protipovodňových opatření v rámci Plzeňského kraje [3].

Zvýšení stupně protipovodňové ochrany je převážně veřejným zájmem. Zvolená míra zabezpečení nebude nikdy absolutní a souvisí nejen s technicko-ekonomickým hodnocením navržených opatření, ale i přípustnou mírou ovlivnění životního prostředí.

Literatura

- [1] Studie proveditelnosti. Přeštice, inundační průlehy koryto v lukách u Příchovic a úpravy koryta Úhlavy ve městě Přeštice. Město Přeštice, 2008.



Obr. 6. Záplavové území po realizaci protipovodňových opatření

- [2] US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center: HEC-RAS User's Manual [online]. USA. [cit. 17. 12. 2008]. Dostupné z: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>.
- [3] Koncepce ochrany vod – Studie protipovodňových opatření Plzeňského kraje. Plzeň, Portál Plzeňského kraje [cit. 19. 7. 2004]. Dostupné z <http://www.plzensky-kraj.cz/article.asp?itm=13712>.

Ing. Marie Lávičková, Ing. Radek Roub, Ph.D.
KVHEM, FZP, ČZU

tel.: 224 382 153, e-mail: roub@fzp.czu.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

The use of mathematical model for analysis of proposed flood-protection measures in meadows by Příchovice (Lávičková, M.; Roub, R.)

Keywords

flood – flood-protection measures – mathematical model – Hec-Ras

The place of interest is situated on the Úhlava River in meadows by Příchovice near the town Přeštice. The proposal of flood-protection measures is contained in Territorial control documentation. The documentation was elaborated on the basis of hydraulic calculations and experiences from the flood in August 2002.

The mathematical model is practically used in the study of analysis of proposed flood-protection measures. The analysis is based on mathematical simulation of water outflow and water level on the Úhlava River. It is possible to use the non-commercial software Hec-Ras, version 3.1.1., for the simulation itself. One of the points of view of the possibility of using proposed flood-protection measures is total efficiency. The mathematical model is possible to use as a basis of support for realization of proposed flood-protection measures on the Úhlava River in meadows by Příchovice within the grant programme "Program prevence před povodněmi II" under the control of the Ministry of Agriculture.

6.2 ČLÁNEK II.

Kurková M., Roub R. et Smolík J., 2012.

Využití matematického modelu pro hydrotechnické posouzení vodních toků v katastrálním území obce Mochtín.

VTEI 2/2012 (54): 9-12. ISSN 0322-8916.

VYUŽITÍ MATEMATICKÉHO MODELU PRO HYDROTECHNICKÉ POSOUZENÍ VODNÍCH TOKŮ V KATASTRÁLNÍM ÚZEMÍ OBCE MOCHTÍN

Marie Kurková, Radek Roub, Jan Smolík

Klíčová slova

povodně – matematický model – HEC-RAS – protipovodňová ochrana

Souhrn

Matematický model je prakticky využit ve studii hydrotechnického posouzení drobných vodních toků v katastrálním území obce Mochtín. Posouzení je založeno na matematickém modelování odtokového a hladinového režimu na vybraných tocích. K vlastní simulaci je použit nekomerční software HEC-RAS. Provedené posouzení by mělo ukázat na riziková místa v obci Mochtín. Matematický model připravený pomocí uvedeného softwaru je možné využít jako podklad pro předběžné hodnocení plánovaných akcí zahrnutých do územního plánu nebo jako zdroj základního přehledu o možnostech protipovodňové ochrany na úrovni menší obce.

Úvod

Množství menších obcí nemá dostatečný přehled o nebezpečí, které představují zvýšené hladiny vodních toků protékající v jejich správních obvodech. Pro své zatížení běžnou agendou nemohou představitelé samosprávy malých obcí získat hlubší povědomí o problematice povodní, souvisejících legislativních předpisech a možnostech získání finanční podpory na preventivní opatření.

V případě zájmového katastru obce Mochtín, jehož intravilánem protékají dva vodní toky, jde o značně nepřesné údaje, které nemohou spolehlivě ukázat míru ohrožení majetku v době povodní. Hydrotechnické posouzení vodních toků s výstupy z matematického modelu pomůže zjistit případné ohrožení při vybraných N-letých průtocích a poslouží pro zjištění kritických míst v dané lokalitě. Na základě zjištěných výsledků bude popřípadě možné přistoupit k účinným protipovodňovým opatřením.

Charakteristika zájmového území

Zájmové území leží v k. ú. Mochtín v blízkosti města Klatovy v jihovýchodní části Plzeňského kraje. Vymezená lokalita je součástí povodí Úhlavy (ČHP 1-10-03) náležejícího do hlavního povodí Labe, úmoří Severního moře.

V intravilánu obce Mochtín byly vybrány úseky dvou vodních toků – Mochtínského a Bystřého potoka (obr. 1). Je nutné také zohlednit odpovídající plochu vymezeného povodí, které může mít vliv na průtoky vody v recipientech. Pro tento účel byl zvolen uzavěrový profil povodí přibližně nad místem levostranného přítoku Srbského potoka. Zájmové povodí, ze kterého je voda odváděna do recipientů, tj. posuzovaných vodních toků, má celkovou rozlohu 25,8 km².

Mochtínský potok, jehož identifikátor vodního toku je 10250426, pramení pod Žďárovským vrchem (637 m n. m.) v k. ú. Chlistov. Protéká intravilánem obce Mochtín a u Klatov se vlévá do Drnového potoka, který je u Svrčovce zaústěn do významného vodního toku Úhlavy. Mochtínský potok tvoří recipient pro sedm levostranných přítoků a osm přítoků pravostranných. Významným přítokem Mochtínského potoka je Srbský potok, který je záu-



Cestní propustek v ř. km 3,800 [2]
Road culvert at the 3,800 river km

stěn z levé strany v ř. km 2,500, a neovlivňuje tedy průtok v obci Mochtín. Na Mochtínském potoce je v k. ú. Soběčice umístěn od roku 1986 limnigraf 2. kategorie, který je ve správě Českého hydrometeorologického ústavu.

Mezi nejvydatnější přítoky patří Bystrý potok, který pramení u obce Bystré pod Pavlovou horou (674 m n. m.), protéká jejím intravilánem a po šesti kilometrech se pravostranně vleává v obci Mochtín do Mochtínského potoka. Povodí Bystrého potoka má rozlohu 9,5 km² a je do něho zaústěno 12 menších přítoků charakteru vodního toku.

Lze konstatovat, že zájmové povodí je protáhlého charakteru, což může mít pozitivní vliv na průběh odtoku. Na rozdíl od povodí plošně zaokrouhlených tyto typy povodí nevytvářejí veliké a časově rychle probíhající odtoky [1].

Stavební objekty na tocích

V zájmovém území je několik stavebních objektů, které za určitých okolností mohou ovlivnit plochu záplavového území. Jde o cestní propustek přibližně v ř. km 3,800 a kamenný mostek na Bystrém potoce.

Cestní propustek tvoří hladká ocelová roura, která je svěpomocí zabudována do tělesa asfaltové komunikace, jež spojuje historický mlýn na pravém břehu Mochtínského potoka se samotnou obcí. Zároveň umožňuje přístup k podzemním vrtům pitné vody pro obec. Ocelová roura je usazena pouze ve dně toku a není na nátokové ani výtokové straně opevněna.

Kamenný obloukový most na Bystrém potoce v obci Mochtín, který představuje historickou zajímavost obce, je umístěn na vedlejší komunikaci vedoucí do osady Hradiště a dále směrem na obec Kolinec.

Ostatní objekty v území

Důležitým objektem je regionální sklad civilní ochrany, který je nevhodně umístěn v blízkosti vodního toku.

Obec a okolní sídla jsou zásobeny pitnou vodou ze dvou podzemních vrtů. Z tohoto důvodu jsou v blízkosti Mochtínského potoka vyhlášeny dvě lokality ochranných pásem vodních zdrojů.

Vzhledem k tomu, že v minulosti bylo na některých lokalitách v zájmovém povodí přistoupeno k plošnému odvodnění systematickou drenáží, je nutné vzít v úvahu možnost ovlivnění hladiny vody ve vodním toku vlivem odtoku z drenážních systémů.

Geodetické zaměření zájmového území

Základním předpokladem pro sestavení matematického modelu bylo provedení geodetického zaměření území. Bylo nutné zjistit převýšení a výškové poměry příčných profilů a všech stavebních objektů umístěných na vymezeném úseku vodních toků Mochtínský a Bystrý. Zaměřovací práce byly prováděny podle zásad odpovídajících rovinné geodezii, podle kterých jsou zaměřovány a zobrazovány menší územní plochy. Zadání je řešeno v rovině. Z toho vyplývá, že veškeré výpočty jsou sestavovány na základě pravidel rovinné geometrie.

Od výškového bodu značky Heg-47 byl s využitím geometrické nivelace ze středu veden nivelační oddíl na první příčný profil, který byl umístěn na Mochtínském potoce v ř. km 3,500.

V každém příčném profilu bylo potřeba polohopisně a výškopisně zaměřit jednotlivé body, které vyžaduje zadávání do matematického modelu HEC-RAS. V každém profilu byl určen bod vymežující levý a pravý břeh koryta, levé a pravé dno koryta, střed koryta a další body pro získání dat k vykreslení okolního terénu toku. V některých úsecích byly pro zjištění objektivnějších dat zaměřeny body vymežující bermu koryta, která vznikla narůstáním drnu.

Vlastní zaměření objektů představovalo zaměření kót s nadmořskými výškami pomocí nivelačního přístroje a změření parametrů staveb. Pro zobrazení objektu v programu HEC-RAS bylo nutné formou příčných profilů zaměřit místa na začátku a na konci objektů [2].

Hydrotechnické posouzení zájmového území

Software HEC-RAS (River Analysis System) je jedním z produktů, které v oblasti hydrologie a hydrauliky vyvinul Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers. Jde o jednorozměrný model (1D), který umožňuje řešení proudění v otevřených korytech včetně analýzy vlivu nejrůznějších typů objektů (např. jezy, mosty, propustky, splavy). Modelované území je popsáno soustavou příčných profilů a popřípadě objektů, přičemž se předpokládá, že proudění probíhá ve směru spojnic mezi jednotlivými profily [3].

Matematický model byl využit pro posouzení a následně stanovení záplavového území pro

Tabulka 1. Upravené hodnoty průtočných objemů odpovídající N-letým průtokům na Mochtínském potoce (ČHMÚ)

Table 1. Adjusted values of N-year discharge on the Mochtínský stream

N	N-leté průtoky [m ³ .s ⁻¹]					
	2	5	10	20	50	100
Průtok	2,87	4,43	6,62	8,81	13,62	11,14

Tabulka 2. Hodnoty průtočných objemů odpovídající N-letým průtokům na Bystrém potoce (Hydroprojekt)

Table 2. Values of N-year discharge on the Bystrý stream

N	N-leté průtoky [m ³ .s ⁻¹]					
	2	5	10	20	50	100
Průtok	1,88	2,05	3,19	6,33	8,50	9,45

jednotlivé N-leté průtoky na Mochtínském (tabulka 1) a Bystrém potoce (tabulka 2).

Výsledky

Výsledkem posouzení jsou záplavové čáry, a tím vytyčení záplavových území pro jednotlivé N-leté průtoky (obr. 2).

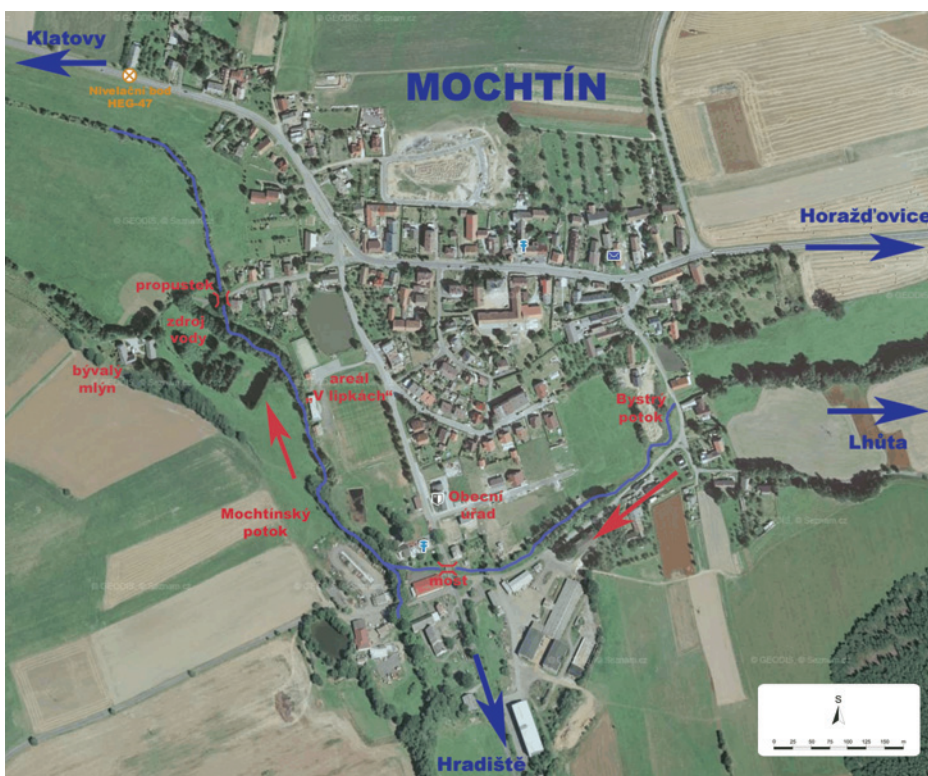
Na základě provedené simulace zvolených jednotlivých průtoků je možné konstatovat, že při průtoku Q_2 nedochází v žádném úseku posuzovaných toků k vylištění vody z koryta.

Při průchodu Q_5 v dolní části Mochtínského potoka dochází na levém břehu k mírným rozlivům na okolní louku. Tento stav není nijak nebezpečný a odpovídá situacím, které se v území občas vyskytují. Louka pod obcí Mochtín tvoří přirozenou rozlivnou plochu a je zaplavována periodicky. Tento stav je z hlediska doplnění zásob podzemní vody prospěšný. Rozliv do plošně rozsáhlé inundace vytváří také dostatečný retenční prostor pro omezení průtoků dále po toku.

Zadáním průtoků odpovídajícím Q_{10} dochází k naplnění kapacity koryta Bystrého potoka a voda se začíná rozlévat v intravilánu obce. Složitější situace při průtoku Q_{10} nastává na Mochtínském potoce, kde cestní propustek již kapacitně nedostačuje a vzdutá hladina vody tak může zasáhnout spodní část přilehlé plochy a provozní budovu sklenářství. Plošně malý rozliv je také možné zaznamenat na soutoku zájmových toků. Rozliv dále způsobuje zaplavení louky podél levého břehu Mochtínského potoka.

Při průběhu simulace Q_{20} je již patrné výrazné zaplavení louky v intravilánu Mochtína. Za této situace se záplavová čára přibližuje ke stavebním parcelám za obecním úřadem.

Pokud by na zájmových tocích došlo k zvestupu hladiny na úroveň padesátileté vody, bude podle vytvořeného matematického modelu zaplavena



Obr. 1. Popis zájmového území
Fig. 1. Description of study area

větší část ochranného pásma vodních zdrojů, tedy podzemních vrtů, které jsou v těsné blízkosti při Mochtínském potoce, zhruba v ř. km 0,380–0,507. Stejně tak dojde k ohrožení dalších obytných budov v místě propustku a zaplavení části sportovního areálu V Lipkách. Zaplavena bude také skladovací plocha soukromé zemědělské společnosti, stejně jako dvůr před skladem civilní ochrany v místě soutoku Bystrého a Mochtínského potoka. Na Bystrém potoce se povodeň projevuje zaplavením zahrad a sklepů domů na pravém břehu ve spodní části toku. Rozliv zasáhne větší část stavebních parcel za obecním úřadem a místní komunikaci v místě křižovatky Mochtín-Lhůta. V případě průtoku odpovídajícího padesátileté vodě lze usoudit, že při rozsahu zaplaveného území by se mohlo jednat o 2. stupeň povodňového ohrožení.

Průtok odpovídající Q_{100} je na základě hydrotechnického posouzení možné charakterizovat jako ohrožující. Přímo je zasaženo přibližně 11 budov, zdroje pitné vody, požární nádrž, provozní plochy soukromých firem, zahrady a část místní komunikace Mochtín-Lhůta.

Shrnutí

Zaplavení přilehlých ploch způsobené vzestupem hladiny posuzovaných toků se začíná projevovat od průtoků odpovídajících desetileté vodě (Q_{10}). Největší problémy způsobuje propustek na Mochtínském potoce (str. 9). Nízká kapacita propustku vytváří vzdutí v ř. km 3,800, které úměrně stoupá s vyššími průtoky. Možným řešením nevhovujícího stavu by byla výměna provizorně vybudovaného propustku za standardní mostní objekt. Lze se domnívat, že důvodem pro nevybudování mostku jsou finanční náklady spojené se stavbou objektu a úpravou komunikace, která je využívána pouze jako příjezdová cesta k bývalému mlýnu a zdrojům podzemní vody pro obec Mochtín. Propustek může rovněž vytvářet překážku pro splávi, které se i v případě menších průtoků může zachytit na objektu a způsobit vzdutí hladiny vody. Tento stav je možné ovlivnit průběžnou kontrolou objektu v době povodňového ohrožení a včasným odstraňováním zachycených předmětů.

Dalším místem, které již při průtocích Q_{10} způsobuje rozliv, je terénní sníženina na pravém břehu Bystrého potoka přibližně v km 0,252 (obr. 3). V těchto místech začíná voda zaplavovat část přilehlé louky za obecním úřadem, která je v územním plánu obce Mochtín určena k zástavbě. Za nevhodnější opatření lze považovat vybudování ochranné zemní hrázky a pročištění koryta od naplavenin, což zvýší jeho průtočnou kapacitu. Je pravděpodobné, že k vybudování ochranné hrázky bude muset obec přistoupit, a to z důvodu plánované výstavby obytných domů v lokalitě.

Hydrotechnickým posouzením bylo zjištěno, že kamenný most na vedlejší komunikaci vedoucí z Mochtína na osadu Hradiště je dostatečně kapacitně dimenzován i pro zvýšené průtoky. Opět je však potřebná kontrola objektu v době povodně a rychlé odstranění popřípadě zachyceného materiálu.

Diskuse

Využití programu HEC-RAS pro hydrotechnické posouzení vybraných úseků Mochtínského a Bystrého potoka se ve výsledku ukázalo jako vhodné řešení, a to s ohledem na náročnost ovládnání aplikace a na dobrou dostupnost programu bez potřeby významnějších nákladů na jeho pořízení.

Zhotovení modelu záplavového území a posouzení kapacity koryta vodních toků při vybraných průtocích, stejně jako posouzení technických staveb v korytě toků může být zatíženo určitou nepřesností vyplývající z menší hustoty geometricky zaměřených bodů. Na této skutečnosti se podílí obtížná dostupnost moderních technických prostředků pro zaměřování a rovněž zvolený způsob zaměření. Podrobnější geometrické zaměření je obecně problematické také hlavně v intravilánu obce, protože je zde mnoho nejrůznějších překážek. Přesto je možné konstatovat, že naměřené hodnoty jsou



Obr. 2. Vytyčení záplavového území
Fig. 2. Scheme of floodplain



Obr. 3. Riziková místa v zájmovém území
Fig. 3. Dangerous places in the study area

pro provedení věrohodného hydrotechnického posouzení koryta vodních toků dostačující a výsledky ukazují na konkrétní místa potenciálního ohrožení při narůstajících průtocích.

Ve výstupech z matematického modelu nemohly být obsaženy další rizikové faktory, které byly zjištěny během přípravných prací v terénu. Tyto faktory spočívají v umístění překážek v průtočném profilu vodních toků a na jejich břehu (obr. 3). Především se jedná o oplocení pozemků zasahujících do koryta toku, umístěných zařízení na odběr povrchové vody, uskladnění různých materiálů na břehu a přemostění formou různých lávek. Uvedené překážky mohou výrazným způsobem zkomplikovat povodňovou situaci v zájmové lokalitě.

V souvislosti s odstraňováním překážek a především s budováním protipovodňové ochrany obce nelze opomenout finanční nároky. Rozpočet malé obce těžko umožňuje financovat odborná protipovodňová opatření z vlastních zdrojů. Systém státem garantované podpory formou dotačních programů vykazuje zatím vyčleněný obnos finančních prostředků, ale důležitá je rovněž finanční podpora na přípravu samotné projektové dokumentace k záměru, protože paradoxně často dochází k situacím, kdy obec nemusí mít potíže se získáním finančních prostředků na realizaci akce, ale z pozice zadatele nemůže předložit potřebnou dokumentaci pro nedostatek několika desítek či stovek tisíc korun na její pořízení.

Při odstraňování nevyhovujícího stavu a i během případných přípravných prací na vybudování protipovodňové ochrany je nezbytná součinnost místní samosprávy se správci vodních toků.

Závěr

Posouzení hydrotechnického stavu části Mochtínského potoka a Bystrého potoka v k. ú. Mochtín ukázalo na několik rizikových míst, která mohou v případě zvýšených průtoků způsobit zaplavení některých částí v intravilánu obce Mochtín. Zejména jde o málokapacitní propustek umístěný na Mochtínském potoce a terénní sníženinu na pravostřanném břehu Bystrého potoka.

Toto posouzení může být využito samosprávou obce Mochtín jako podklad pro přehodnocení některých plánovaných akcí zahrnutých do územního plánu obce. Stejně tak je využitelné jako zdroj základního přehledu o protipovodňových opatřeních v obci, která by snížila škody na majetku.

Vysoké materiální škody a ztráty na lidských životech po povodních, které v poslední době opakovaně postihují naše území, ukazují na nutnost být na tento hydrologický extrém připraveni. Je třeba si také uvědomit, že povodně nezpůsobují jen negativa, ale mají mnohdy pozitivní přínos. Určitým směrem v protipovodňové ochraně by mělo být naučit se s povodněmi žít a respektovat vodu jako živou, který nejen přináší užitek, ale někdy je také hrozbou.

Literatura

- [1] Jůva, K., Hrabal, A. a Tlapák, V. (1984) Malé vodní toky. Praha: Státní zemědělské nakladatelství.
- [2] Smolík, J. (2011) Hydrotechnické posouzení Mochtínského potoka a Bystrého potoka v k. ú. Mochtín (diplomová práce). České zemědělské univerzity v Praze.
- [3] HEC-RAS User's Manual [on line]. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, USA [cit. 17. 12. 2008], dostupné z: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>

**Ing. Marie Kurková, Ing. Radek Roub, Ph.D., Ing. Jan Smolík
katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování,
Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze
lavickovam@fzp.czu.cz**

Příspěvek prošel lektorským řízením.

The use of mathematical model for hydrotechnical analysis of stress in the cadastral unit of Mochtín (Kurková, M.; Roub, R.; Smolík, J.)

Keywords

flood – mathematical model – HEC-RAS – flood protection measures

The mathematical model is practically used in the study of hydrotechnical analysis of streams in a cadastral unit. The analysis is based on mathematical simulation of water outflow and water level on chosen streams. It is possible to use the non-commercial software HEC-RAS for the simulation itself. The analysis should show dangerous places in the place of interest. The mathematical model can be used as a basis for reevaluation of action in the spatial plan or for a survey of the flood-protection measures in the village of Mochtín.

6.3 ČLÁNEK III.

Roub R., Kurková M., Hejduk T., Bureš L. et Novák P., 2015.

Comparing a hydrodynamic model from 5th generation DRM data and a model from data modified by means of crosolver tool.

Príspevek je prijat do recenzního řízení v AUC Geografica.

COMPARING A HYDRODYNAMIC MODEL FROM 5TH GENERATION DRM DATA AND A MODEL FROM DATA MODIFIED BY MEANS OF CROSOLVER TOOL

Radek Roub¹⁾, Marie Kurková¹⁾, Tomáš Hejduk^{1,2)}, Luděk Bureš¹⁾, Pavel Novák²⁾

¹⁾ **Czech University of Life Sciences Prague** - The Faculty of Environmental Sciences,
Department of Water Resources and Environmental Modeling
Kamýcká 1176, 165 21 Prague 6 – Suchdol

²⁾ **Research Institute for Soil and Water Conservation**
Žabovřeská 250, Prague 5 Zbraslav

Keywords

aerial laser scanning (ALS) – hydrodynamic model – HEC-RAS – CroSolver – cross profile - floods

Summary

Flood is a natural phenomenon that occurs at different intensities and irregular time intervals. As to natural disasters, floods represent the greatest direct threat for the Czech Republic. They may cause serious critical situations during which not only extensive material damages are done, but may bring also losses of the lives of inhabitants in affected areas as well as vast devastation of cultural landscape including environmental damages. Important from the viewpoint of the elimination of potential threats and consequences of such events is the information issued by flood forecasting service about the character and size of flood areas for individual N-year flood discharges and specific flood scenarios. An adequate image of depths and flow rates in the longitudinal or cross profile of the watercourse during a flood event is provided by the hydrodynamic model. This is why the information obtained from the hydrodynamic models occupies a privileged position from the viewpoint of the protection of citizens' lives and mitigation of damage to their property.

Basic input into the hydrodynamic models is represented by altimetry data. One of ways to obtain such data is through the method of aerial laser scanning (ALS) from the digital relief model (DRM). This method is considered one of the most accurate methods for obtaining altimetry data. Its bottleneck is however incapacity of recording terrain geometry under water surface due to the fact that laser beam is absorbed by water mass. The absence of geometric data on watercourse discharge area may perceptibly affect results of modelling, especially if a missing part of the channel represents a significant discharge area with its capacity. One of methods for eliminating the deficiency is a sufficient channel recess by means of software tools such as CroSolver.

The submitted paper deals with the construction of a hydrodynamic model using 5th generation DRM data, and compares outputs from this model at various discharges with a model based on the altimetry data modified by using the CroSolver tool. Outputs from the two hydrodynamic models are compared in HEC-RAS programme with the use of recessed data and with the use of unmodified DRM. The comparison is done on the sections of two watercourses with different terrain morphology and watercourse size. A complementary output is the comparison of inundation areas issuing from both model variants.

Our results indicate that differences in the outputs are significant namely in the lower discharges (Q_1 , Q_5) whereas for Q_{50} and Q_{100} the difference is negligible with a great role being played by morphology of the modelled area and by the watercourse size.

1. Introduction

Hydrodynamic models are used to simulate hydraulic phenomena, issuing from the physical characterization of flowing, namely the law of mass, momentum and energy conservation. As to solution details and input data requirements, they are divided into one-dimensional (1D), two-dimensional (2S), and/or combined (1D/2D) (Roub et al., 2015).

The main factor in the creation of hydrodynamic models is input data for developing watercourse computational geometry (Ernst et al., 2010). Requirements for input data differ with respect to the hydrodynamic model used. One-dimensional (1D) hydrodynamic models feature lower requirements for input data when the computing track is formed by channel cross profiles. By contrast, in two-dimensional (2D) hydrodynamic models, a digital relief model has to be constructed for the entire territory in question. An alternative to the above-described models are quasi-2D modelling approaches, which combine the computational 1D or 2D approaches (Lindenschmidt, 2008). In the latter, the actual complicated spatial geometry is artificially divided into parts of a branched or ring network composed of several partial models, e.g. channel and inundation (Valentová et al., 2010; Valenta, 2005).

In the case of one-dimensional modelling, methods used to obtain data of the computational geometry of watercourse and adjacent inundation include geodetic surveying, photogrammetry, ALS or their combinations (Novák et al., 2011).

Geodetic surveying of the channel and adjacent inundation of watercourses is the most time- and cost-consuming method to ensure information about the geometry of watercourses with respect to the size of the surveyed point field (Bharat and Mason, 2001). Obtaining data for hydrodynamic models includes topographic surveying of watercourse axes, topographic and altimetry cross profiles and objects on the watercourse. Distance between individual surveyed cross profiles ranges from several tens to several hundred metres and depends especially on the variability of river channel shape. The surveying is to record watercourse spatial changeability, namely changes of channel cross section and changes in longitudinal gradient. The usual distance of cross profiles on streams in the Czech Republic ranges between 50-100 m in the intravillan and 200-400 m in the extravillan (Drbal et al., 2012).

Geodetic surveying is also a necessary part of aerial photogrammetry where it is used for surveying geodetic coordinates and elevation of ground control points. Ground control points serve to determine orientation, scale and for transformation into the geodetic system. This is a procedure how to identify the captured images with the actual terrain (Pavelka, 2009).

Photogrammetry is a scientific discipline falling under geodesy and cartography, which deals with the acquisition of geometric data from image records, i.e. photographs. Aerial photogrammetry uses two appropriately captured images (stereo-photogrammetry) that show the same area with a certain overlap. Data collection is further limited by using a passive sensor, which is affected by atmospheric processes. Aerial photogrammetry is used for the collection of topographic and altimetry data on large and medium scales at sufficient accuracy and with considerably lower costs and lower time consumption than with the use of geodetic methods. The low time consumption makes it possible to repeat the scanning and hence to maintain the data topical (Metodický pokyn /Methodological instruction/, 28181/2005-16000).

The third method of collecting spatial data for the construction of watercourse computational geometry in hydrodynamic models is aerial laser scanning. The ALS method is one of the most advanced technologies for harvesting topographic and altimetry data. Aerial laser scanning has been developed for the fast and operative mapping of large areas where the standard methods (tachymetry, GPS, photogrammetry) are no longer sufficient (Dolanský, 2004).

The ALS method dwells on the principle of laser beam reflection while a precise position of the scanner and at the same time a precise direction of beam sending have to be known. The principle consists in recording the time between the sending of the laser beam (as a rule within the field of infrared spectrum) and the reception of its reflection. The position of a given point is

computed by processing the parameter (Wehr et Lohr, 1999; Dolanský, 2004; Novák et al., 2011; Oršulák et Pacina, 2012). The advantage of the method consists in fast data collection, relatively low costs, capacity of surveying difficult terrains and large areas (Charlton et al., 2003).

Currently running in the Czech Republic (CR) is new altimetry mapping with the use of ALS method, which links up with current altimetry databases that are already obsolete in certain territorial types, their quality and accuracy adversely affecting the quality of national map works as well as digital geographic databases of the Czech Republic (Brázdil, 2009). The goal is to ensure in collaboration with the State Administration of Land Surveying and Cadastre (ČUZK), CR Ministry of Agriculture and CR Ministry of Defence a high-quality geographic data infrastructure that would be uniform and standardized for the whole territory of the Czech Republic.

2. Methodology

2.1 The underlying data

The basic groundwork was 5th generation DRM altimetry data of the Czech Republic. The data were provided by the State Administration Land Surveying and Cadastre (ČUZK), and delivered in the S-JTSK coordinate reference system and Balt height reference system after fitting (Bpv) in ASCII coding and format of X, Y and H values.

Data on N-year discharges were taken from the Registration sheet of crier profile no. 127 for the Otava River, and no. 182 for the Úhlava River (Tab. 1).

Lokalita	N – year discharges Q_n [m ³ /s]				
	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
Otava R.	146	300	394	680	837
Úhlava R.	36.7	82.4	111	201	250

Tab. 1. Flow volumes corresponding to N-year discharges

2.2 Areas of interest and their characteristics

The hydrodynamic models were constructed for sections of two watercourses of different terrain morphology and stream size. The first locality of interest was a section on the Otava River in Písek and the second one was a section on the Úhlava River in Přeštice.

2.2.1 The Otava R. locality

The Otava River locality is represented by a stream section of 2,224 m in the cadastral area of Písek municipality. The section is delimited by river km 22.4 – 24.6 and was divided into a total of 20 cross profiles (Fig. 1). The selected stream section is situated in the central and north-eastern parts of the town.

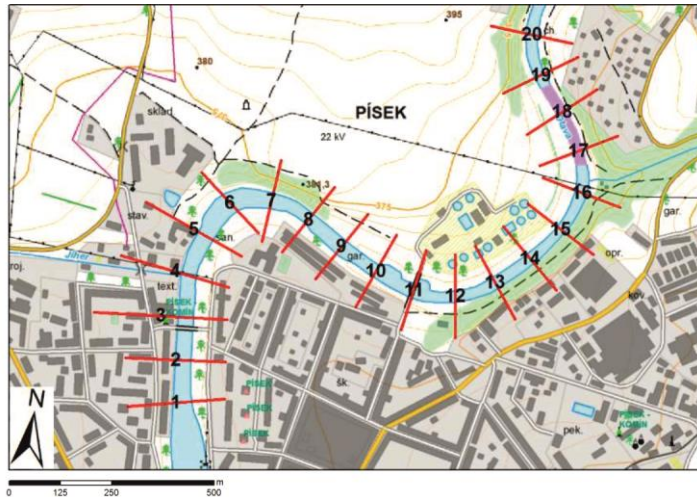


Fig. 1. Localization of cross profiles on the Otava R. section

The Otava River is a watercourse of 3rd order and a left-bank tributary of Vltava (Moldau) River, originating through the confluence of Vydra R. and Křemelná R. in the Šumava Mts. near Čeňkova Pila. In the selected stream section, the Otava R. features already a typical lowland character with an average water surface width of about 35 m. The average annual discharge in this section is 23.4 m³/s and the average annual water level height is 90 cm (ČHMÚ, 2015a).

2.2.2 The Úhlava R. locality

The second concerned locality is a 1,280 m long section of the Úhlava R. situated in the cadastral area of Přeštice. The section is delimited by river km 30.5 – 31.7 and was divided into a total of 13 cross profiles (Fig. 2). The Úhlava River is a watercourse smaller than the Otava R. and its average annual discharge is 5.51 m³/s (ČHMÚ, 2015b). Terrain morphology is very specific with the entire right-bank side lying very low and therefore, extensive spills can be expected if the stream overflows the banks.

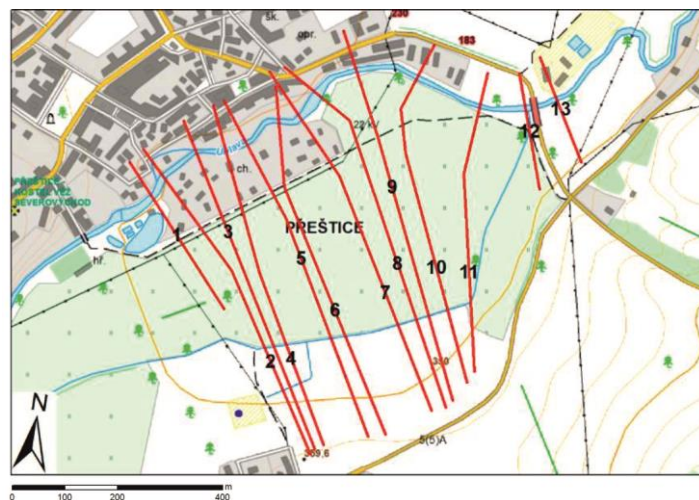


Fig. 2. Localization of cross profiles on the Úhlava R. section

2.3 CroSolver Toolbox

Regarding the fact that laser beam does not penetrate water surface at ALS, the real shape of the channel is neglected, which may cause a considerable distortion of results at hydrodynamic modelling (Podhoranyi and Fedorcak, 2014). CroSolver (Cross section Solver) tool was developed to resolve the problem; it is available in two variants: CroSolver as a library of functions for Programming Language R (Roub et al., 2012b), and as a CroSolver Toolbox consisting of scripts written in Python language for use in ArcGIS programme (Roub et al., 2015).

The basic computing diagram of the tool is shown in Fig. 3. Within the pre-processing, cross profiles are constructed first based on specified distance between the profiles and watercourse width with the distance between the profiles affecting details of the results. Reccessing then takes place based on other parameters of the channel at the time of ALS such as discharge, channel roughness coefficient, slope gradients, water surface smoothing distance and selection of reccessing method (Roub et al., 2015).

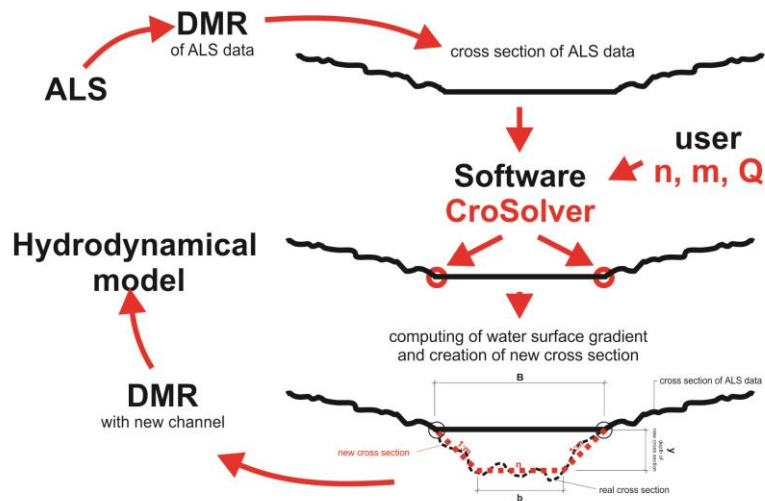


Fig. 3. CroSolver tool basic working scheme (CroSolver, 2014)

In the next step, the constructed cross profiles are prepared for recess computation. The constructed cross profiles are two-dimensional only. Marginal points of the cross profiles are to characterize the contact points of water surface and channel bank. Because we search a point that is as close to the water surface as possible, it holds that such a point has the lowest height. This is why a radius of searching such a point is entered into the tool. The tool will find the lowest point in the field of search, and will return its height and position onto the vertical to the cross profile. A point defined in this way characterizes a point on the bank slope at the water surface.

The computation of watercourse channel recess is based on data from the pre-processing and on the characteristics of watercourse channel. The computation is carried out for steady uniform flow with the use of continuity equation and Chézy equation with the calculation of flow rate coefficient according to Manning:

$$Q = v \cdot S$$

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

$$R = \frac{S}{O}$$

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

where: Q – discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), S - discharge area, (m^2), v – flow rate, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), C – flow rate coefficient, ($\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$), i – water level gradient, (-), R – hydraulic radius, (m), n – Manning's roughness coefficient, (-) (Roub et al., 2015).

2.4 Construction of Digital Relief Model in ArcGIS programme

The 5th generation DRM data were delivered in ASCII coding in *.xyz format. Therefore, it was necessary to convert them into a shape file first (namely a point layer) in ArcGIS programme by using the function ASCII 3D to feature class from the extension of 3D Analyst. Subsequently, a digital terrain model was constructed from the point layer in the TIN format. The resulting TIN model in the Pisek territory is shown in Fig. 4.

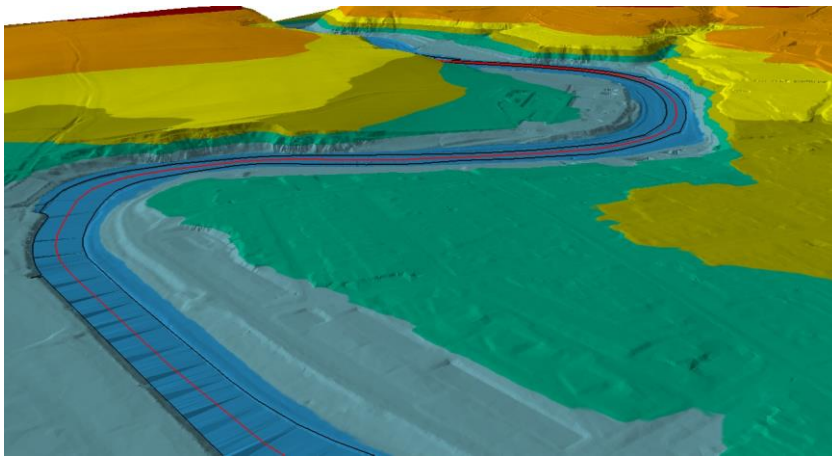


Fig. 4. 3D display of the Pisek locality digital terrain model

2.5 Creation of geometry in HEC-GeoRAS extension

One of basic inputs into HEC-RAS programme is computational geometry of watercourse. It is formed primarily by the watercourse axis, embankment lines and cross profiles with altimetry data. All groundwork documents were created in ArcGIS programme by means of HEC-GeoRAS extension, which allows a direct export of data in the form applicable for HEC-RAS.

In the case of the Otava River, a possibility was used for an automated distribution of profiles with minor manual modifications so that the profiles do not cross one another and characterize watercourse geometry as realistically as possible. For the Úhlava River, asymmetric profiles had to be constructed with respect to the large inundation area on the right bank of the watercourse. The profiles were plotted manually with a wrap to prevent their crossing

A 3D layer of cross profiles was constructed by using the *RAS Geometry – XS Cut Line Att. – All* function. Thus, the attribute table of cross profiles was filled (namely the stationing added), and a layer was created of cross profiles with the altimetry information taken from the digital terrain model.

2.6 Channel recessing by means of CroSolver Toolbox

Input layer into the CroSolver tool is the stream axis vectorized against the flow direction. Another input is DRM in the text format *.txt. Data from the State Administration of Land Surveying and Cadastre (ČÚZK) were provided in the *.xyz format; hence it was necessary that they are stored in the required format first. The recessing itself is made in three steps.

In the first step, a file of the watercourse input axis had to be chosen and parameters for dividing the watercourse into individual polygons, i.e. distance between cross profiles and average width of the watercourse. Distance of profiles and watercourse width for the Otava River and Úhlava River were adjusted as 80 m (30 m) and 60 m (15 m), respectively.

In the second step, an output file from the previous step was entered (either as a text file or as a shapefile) and DRM in the *.txt format. In both cases, the radius of searching the lowest point was adjusted as 10 m.

In the third step, the input to be entered was an output from the previous step and optional parameters were: method of recess computation, discharge, roughness coefficient according to Manning, slope gradient and minimum distance for water level calculation (Tab. 2). The discharge value entered was actual value measured at the time of data acquisition by ALS.

Parameter	Otava R.	Úhlava R.
Method of calculation	by gradient	by gradient
Discharge [m ³ .s ⁻¹]	15.2	3.612
Roughness coefficient [-]	0.033	0.026
Slope gradient 1:m [-]	2	2
Min. distance for water level calculation [m]	100	100

Tab. 2. Parameters chosen at channel recessing

2.7 Hydrodynamic model construction in HEC-RAS programme

Two models were constructed for the two localities in HEC-RAS 4.1.0 programme, which differed only in their input geometry data. The entered values of discharge, roughness and marginal conditions were identical. Values entered for the Otava R. were as follows: channel – 0.033, left bank in the first three profiles where a smooth concrete wall occurs – 0.026, remaining banks with mainly grasslands – 0.03. Roughness values chosen for the Úhlava R. were as follows: channel – 0.026, banks with grasslands – 0.027.

The upper marginal conditions were given by N-year discharges - Q₁, Q₅, Q₁₀, Q₅₀ and Q₁₀₀. The lower marginal condition chosen included Critical Depth, where the programme will compute a critical depth for each profile and other data to enter are not needed. The proper simulation of the models was performed in the sub-critical flow regime.

In the case of the Úhlava River, the geometry data had to be additionally modified. Regarding a great similarity of 5G DRM data and the width of cross profiles, the number of points exceeded the maximum value (500) in some profiles. In such profiles, the excessive points had to be filtered off in the environment of geometry data editing (Fig. 5).

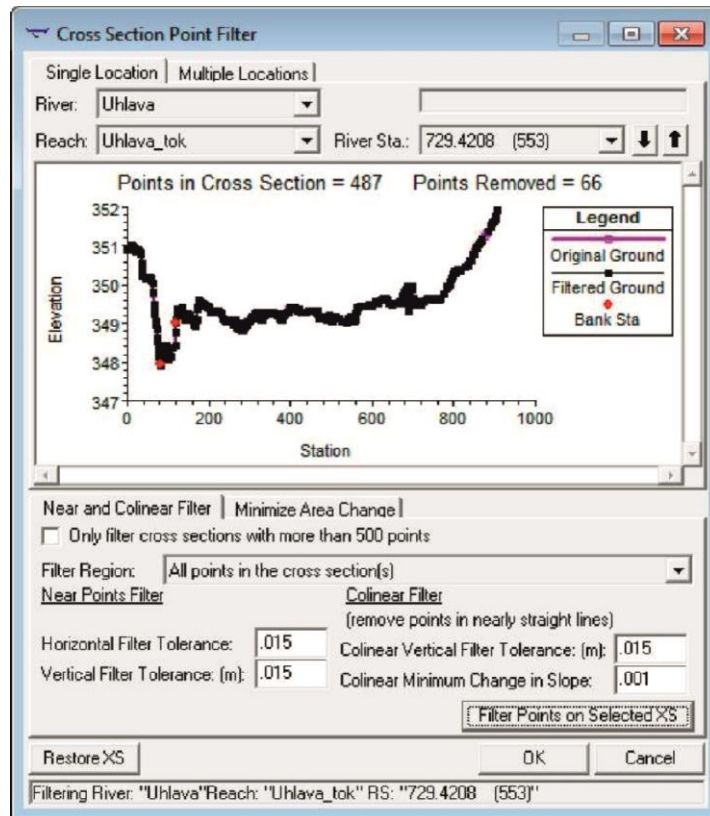
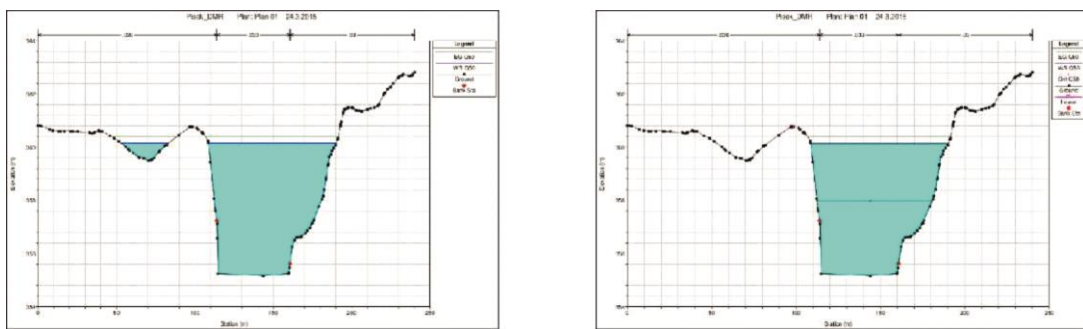


Fig. 5. Filtering off points in cross profiles

Other modifications were necessary on the Otava R. where the "levees" criterion had to be added (Fig. 6). The HEC-RAS programme models flooding in the cross section according to altitudes not considering however the terrain obstacles that water would have to overcome first. Inserted into the cross sections were stationing and altitudes of needed points.



(a) Result without using t

(b) Result with using the „levees“

Fig. 6. Comparison of models with/without the levees criterion

Regarding terrain morphology, this measure was not used on the Úhlava R. Based on the exploration of DRM and aerial photograph of the area, spilling was considered over the entire surface since terrain roughness was low and sparse.

3. Results

Results are presented by the graphic comparison of three output characteristics from the HEC-RAS models:

- a) water surface altitude,
- b) discharge area,
- c) width at water surface.

For a comparison, both the course of values along the entire longitudinal profile is illustrated and the average values of differences in the characteristics of all cross profiles for the respective N-year discharges. Average deviations were calculated by deducing the value of the recessed channel from the non-recessed channel. Moreover, inundation areas were compared issuing from the respective models. Summary charts include plotted results for the non-recessed channel (DRM 5G) and for the recessed channel (CroSolver).

3.1 Evaluation of the Otava R. locality

Fig. 7 shows an example of watercourse channel recessed by using the CroSolver tool as compared with an untreated profile from 5G DRM data. The only difference in geometry apparently occurs only in the channel while the inundation area and surroundings do not change by using the process.

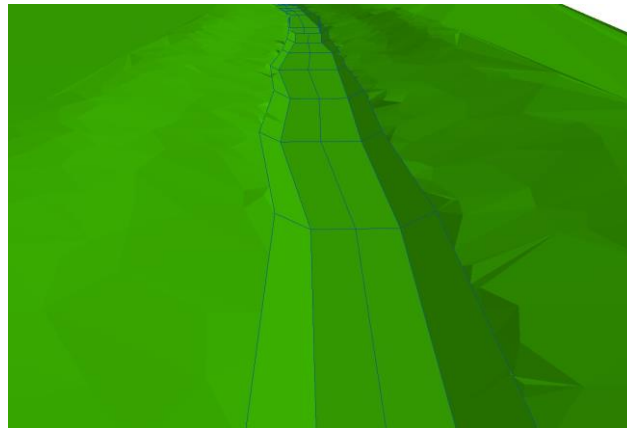


Fig. 7 Example of the recessed profile as compared with the non-recessed profile

3.1.1 Comparison of water surface altitudes

It follows from Figs. 8 and 9 that the difference between the altitudes of water surface for the recessed and non-recessed watercourse channel steadily decreases. In some discharges we can even see a phenomenon when the 5G DRM result corresponds to a different N-year CroSolver result (for example a 5G DRM based model for Q_5 gives nearly identical results as a model with the recess for Q_{10}).

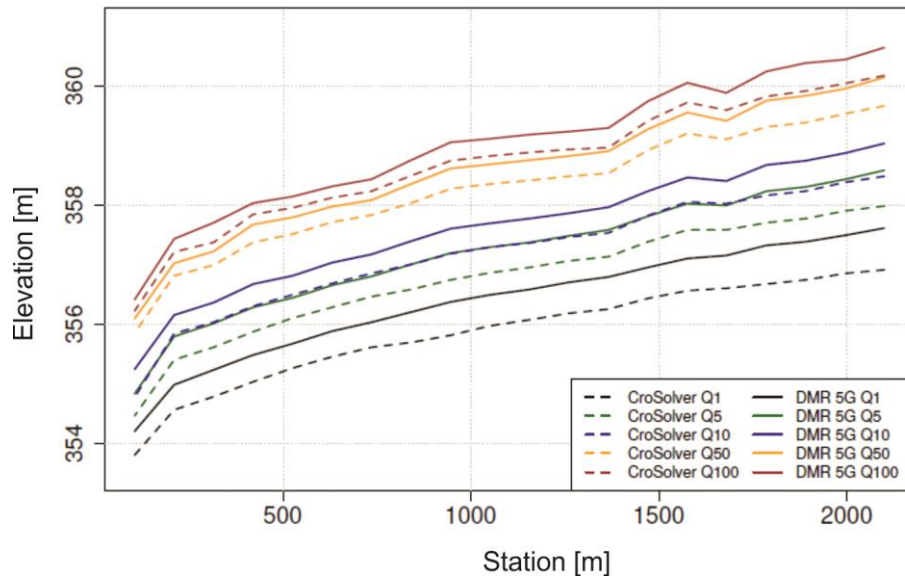


Fig. 8 Comparison of water surface altitudes in longitudinal profile for individual discharges

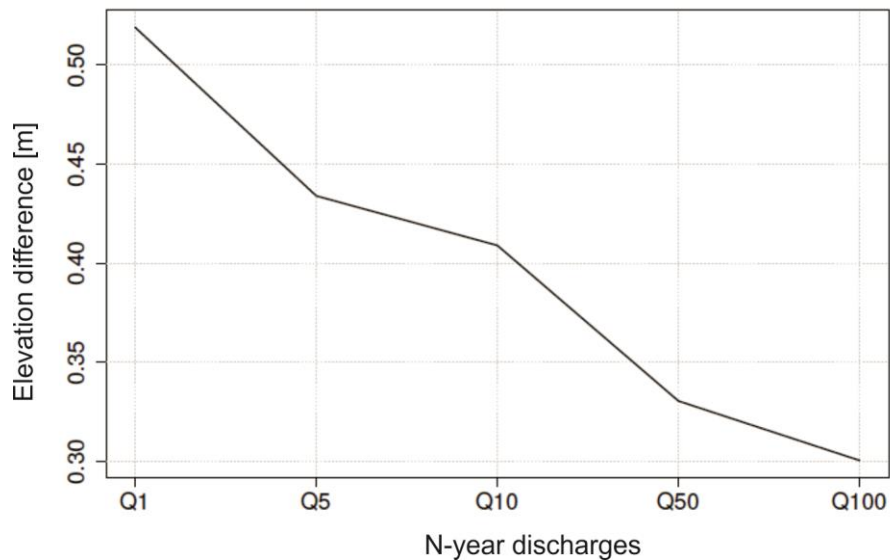


Fig. 9 Average deviation of altitudes for individual discharges

3.1.2 Comparison of discharge areas

In discharge areas, the trend is less clear (Fig. 11). The difference in the discharge areas gradually decreases first, being generally insignificant, and the discharge area from the recessed model in Q₅₀ is even larger than that from the non-recessed model. A shift in Q₁₀₀ can be explained based on Fig. 10 where a sudden increase of discharge area in two cross profiles is obvious in the results based on 5G DRM. These deviations were caused by watercourse overflowing at given places in the non-recessed model and by the subsequent spill, which significantly changes the discharge area shape. An example of the spill difference in the specific profile is shown in Fig. 12.

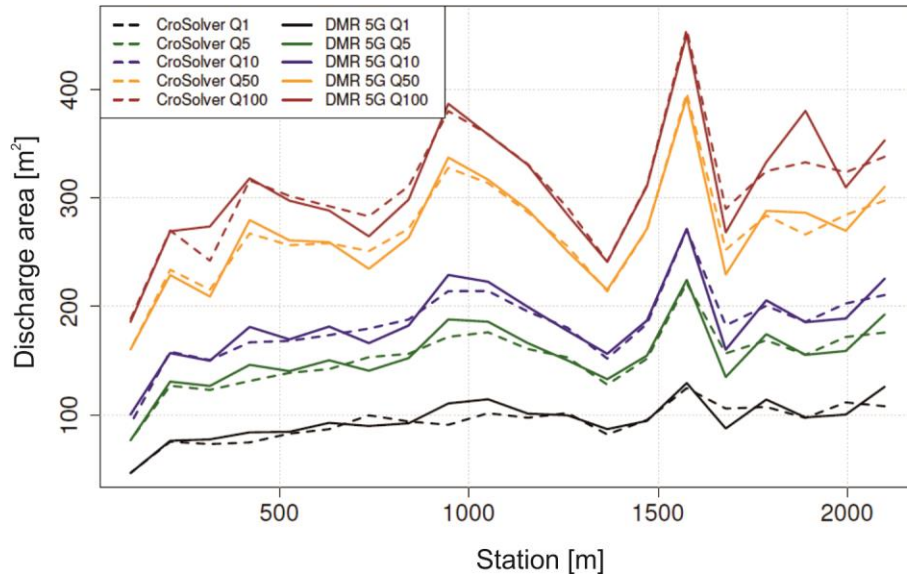


Fig. 10 Comparison of discharge areas in longitudinal profile for individual discharges

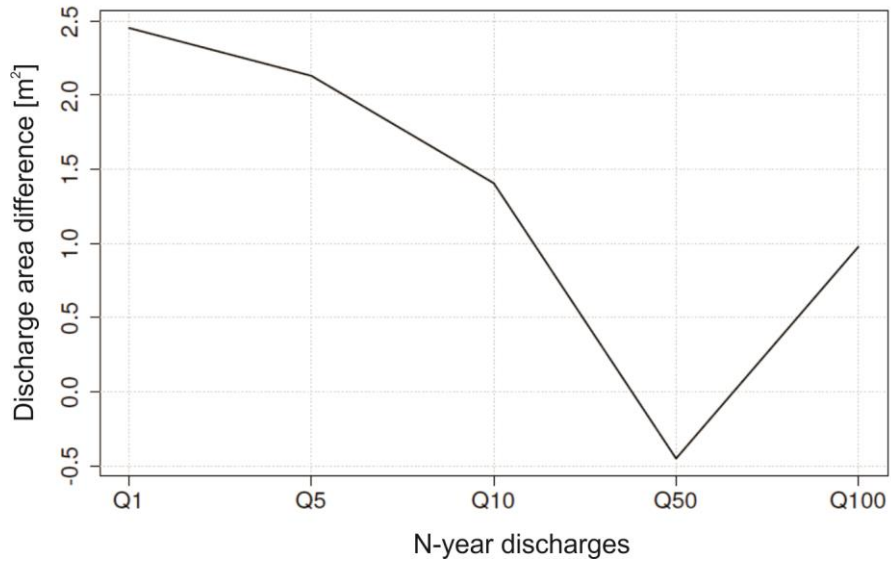


Fig. 11 Average deviation of discharge areas at individual discharges

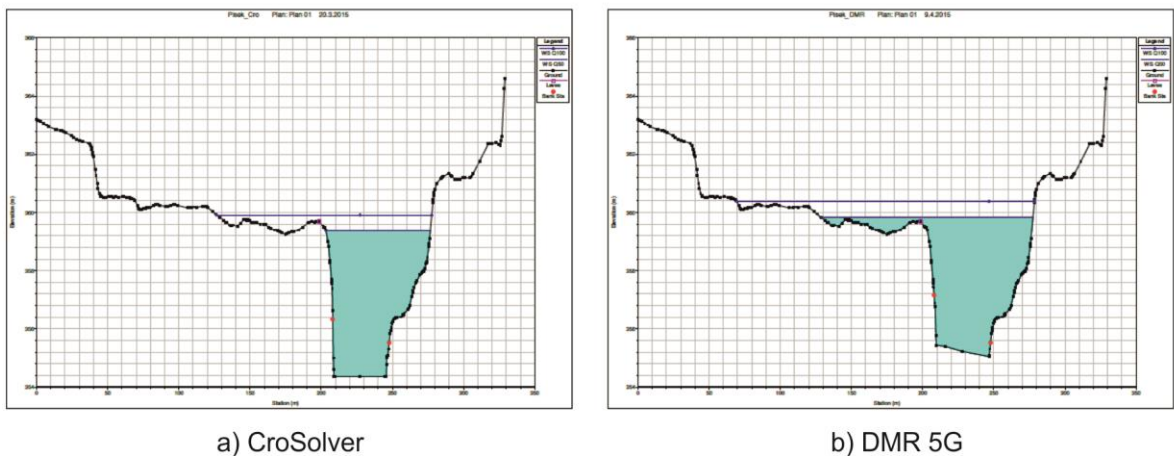


Fig. 12 Comparison of spills in profile no. 3 - Q_{50} and Q_{100}

3.1.3 Comparison of widths at surface

Width at surface significantly depends on terrain morphology. Due to different spills, average differences are distorted (Fig. 14). The situation is similar as in the case of discharge areas. The result can be better seen from Fig. 13. The difference in widths at surface is apparently pronounced namely in lower discharges (Q_1 , Q_5 and Q_{100}) whereas the course is practically identical on a greater part of the section for Q_{50} and Q_{100} . Exceptions are several cross profiles where larger spills occurred into the inundation area for the 5G DRM based model, and hence an abrupt growth of difference in width at surface was recorded (Fig. 12).

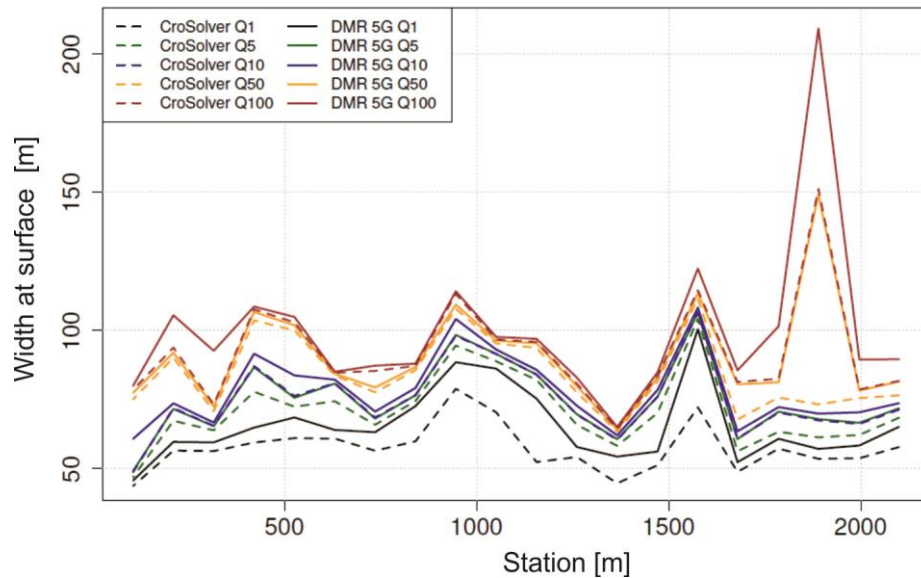


Fig. 13 Comparison of in longitudinal profile for individual discharges

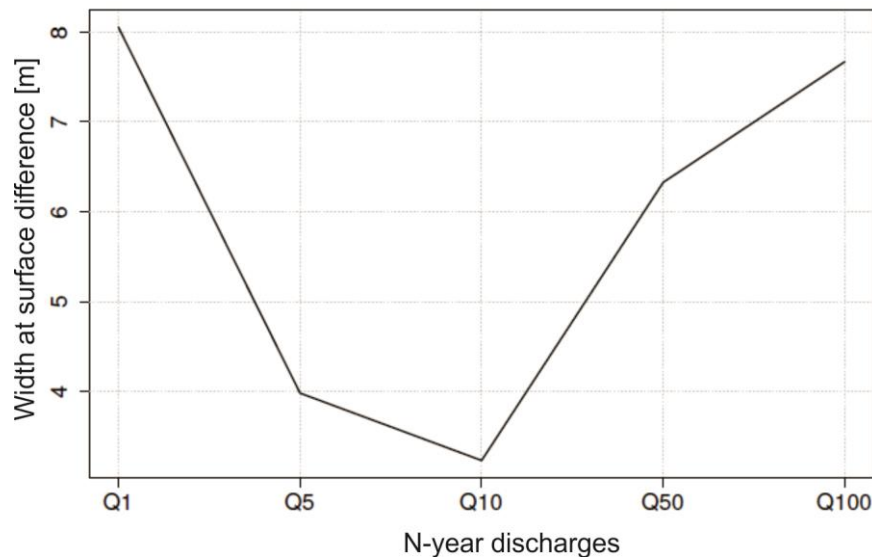


Fig. 14 Average deviation of widths at surface at individual discharges

3.1.4 Comparison of inundation areas

Inundation area Q_1 was chosen to illustrate differences in spill. Fig. 15 shows that differences in the inundation area were minimal even for the lowest discharge for which all monitored characteristics exhibited the greatest differences between the recessed model and the non-recessed model.



Fig. 15 Comparison of inundation area at discharge Q_1 in the Otava locality

3.2 Evaluation of the Úhlava R. locality

Fig. 16 brings an example of cross profile on the concerned Úhlava R. section. It is a characteristic example of terrain morphology in the given locality with an extensive inundation area stretching along the right bank.

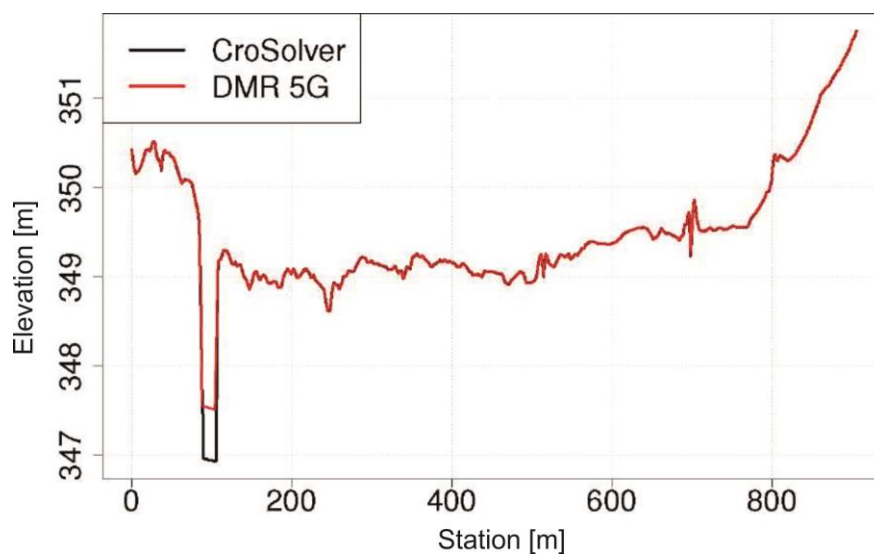


Fig. 16 Comparison of profile no. 9 geometry

3.2.1 Comparison of water surface altitudes

Figs. 17 and 18 indicate that a significant difference in water surface altitudes was observed namely at Q_1 . With this discharge, overflowing occurred only in the non-recessed model, and the channel modified by CroSolver tool was still having a sufficient capacity for converting this discharge. For Q_{50} and Q_{100} , the difference in water surface altitudes was already negligible.

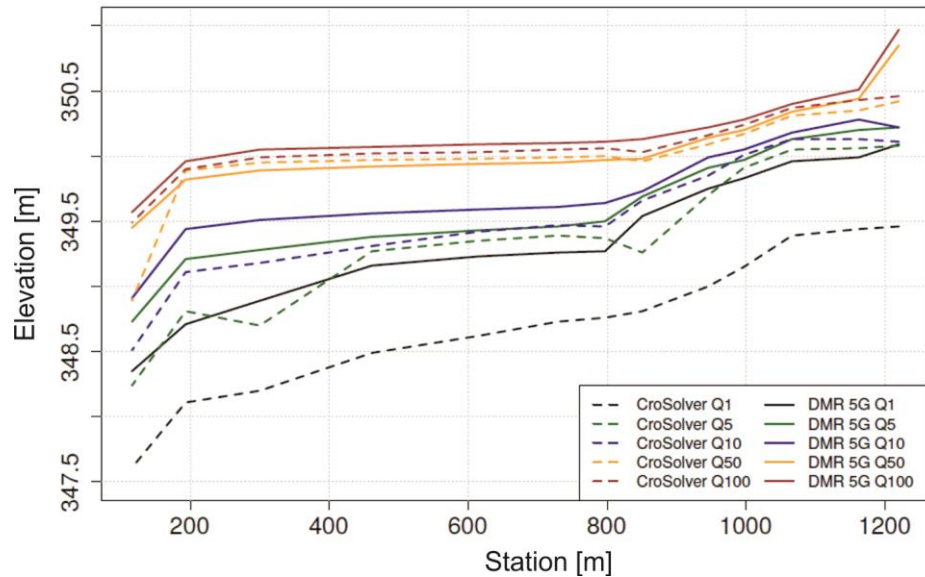


Fig. 17 Comparison of water surface altitudes in longitudinal profile for individual discharges

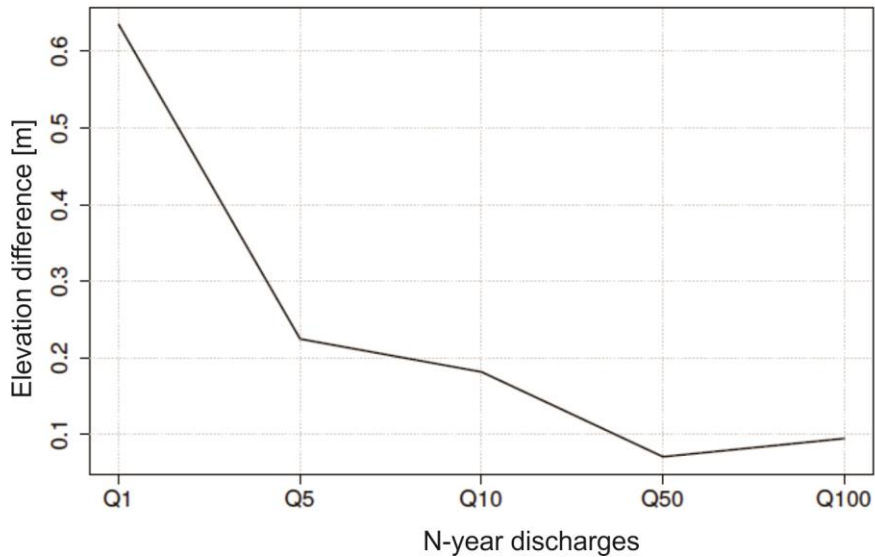


Fig. 18 Average deviation of altitudes at individual discharges

3.2.2 Comparison of discharge areas

Regarding the rugged terrain and extensive spill, the discharge area was considerably changeable here. Figs. 19 and 20 show ambiguous results for this characteristic.

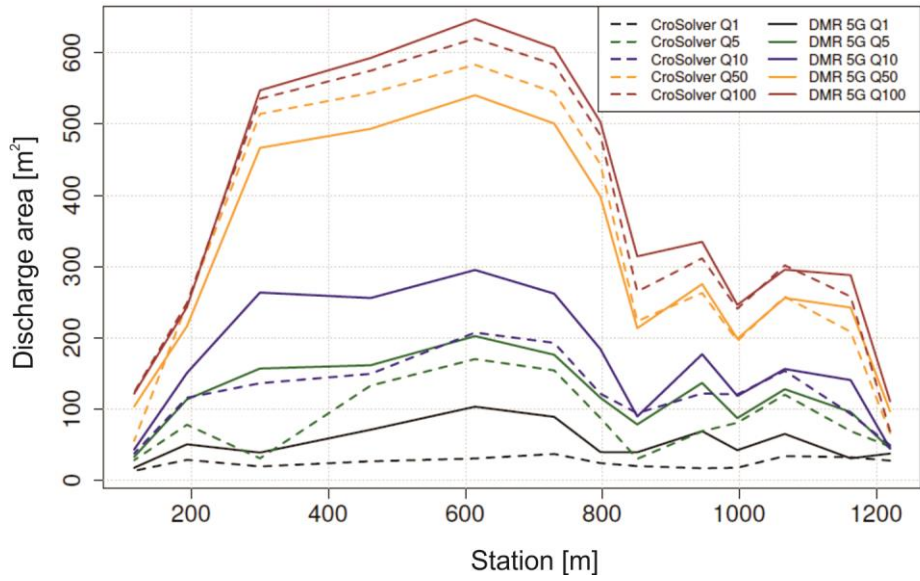


Fig. 19 Comparison of discharge areas in longitudinal profile for individual discharges

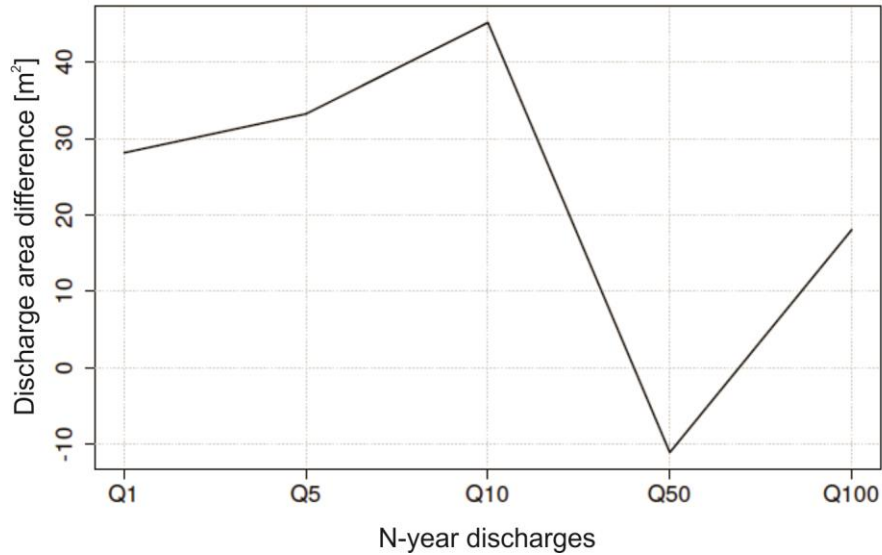


Fig. 20 Average deviation in discharge areas at individual discharges

3.2.3 Comparison of widths at surface

The resulting widths at surface reflect once again the mode of water spill into the inundation area. Figs. 21 and 22 show that differences in the widths at surface are gradually dwindling up to Q₅₀ and Q₁₀₀ where the courses of widths at surface are practically identical for the two model options.

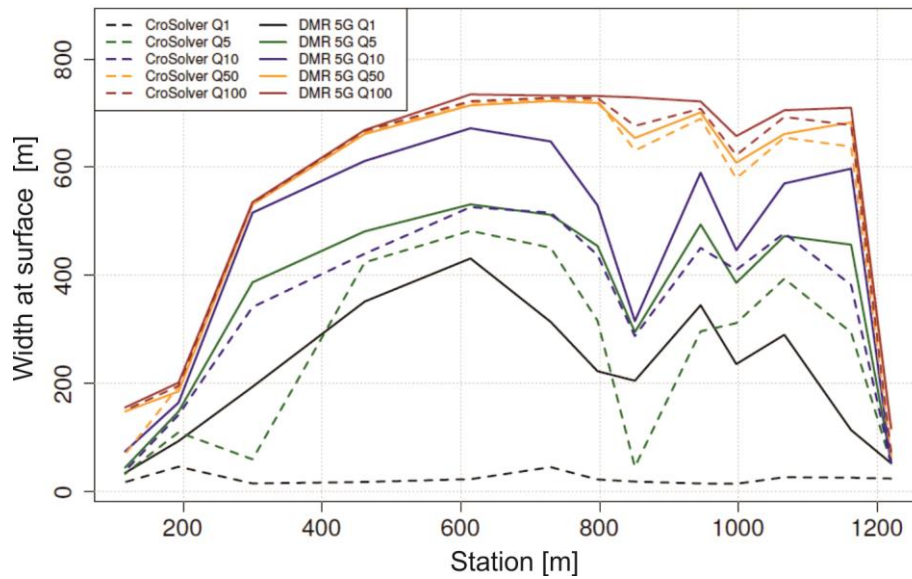


Fig. 21 Comparison of widths at surface in longitudinal profile for individual discharges

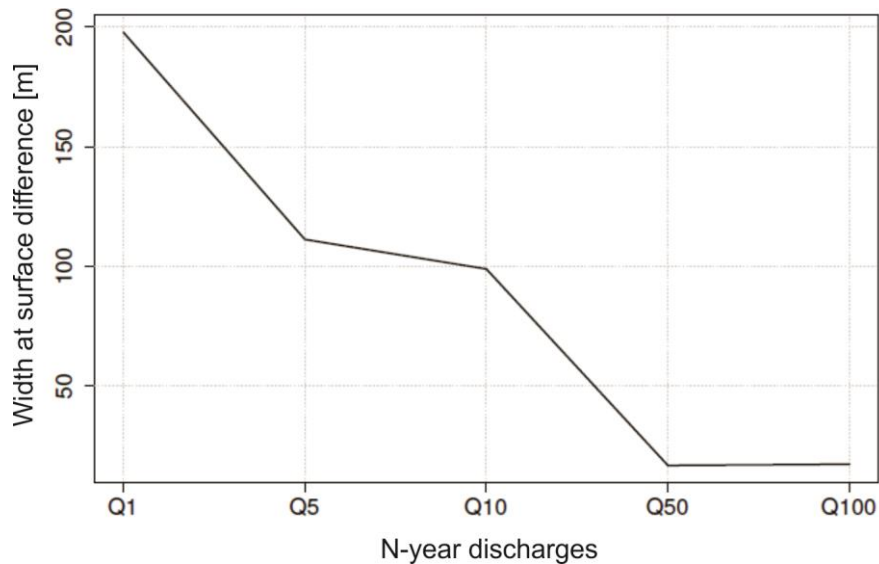


Fig. 22 Average deviation of widths at surface at individual discharges

3.2.4 Comparison of inundation areas

A simulation of Q_1 was chosen for illustration. Fig. 23 shows the difference in spills caused by the sufficient retention capacity of the channel in the model with the recessed channel as compared with the insufficient channel capacity in the non-recessed model. In the other variants, the difference was not so conspicuous regarding the fact that bank overflow occurred also in the recessed model.



Fig. 23 Comparison of inundation areas at discharge Q_1 in the Úhlava R. locality

4. Discussion

This paper deals with a synthesis of data from hydrological measurements and ALS, which offer themselves as an alternative to the use of data from geodetic measurements in hydrodynamic modelling. One of outputs is the assessment of a possibility for using ALS data in water management while the development of specialized tools such as CroSolver attempts to eliminate ALS based input data into hydrodynamic modelling.

The main source of error at using the unmodified DRM from ALS data is negligence of the flooded part of watercourse channel by which the size of discharge area is affected and the moistened perimeter in particular.

It should be pointed out however that even the use of the geodetic survey itself may bring some problems such as for example cross profiles of insufficient capacity or a too large distance between the cross profiles. In the case of using the cross profiles from DRM, these deficiencies can be easily eliminated; however, the use of geodetically oriented data requires for example additional elongation of the cross profile or interpolation of cross profile on the watercourse directly in the modelling software (HEC, 2010). These procedures may introduce errors into the computation.

Errors can be introduced also by using the CroSolver tool. Based on the sensitivity analysis, Roub et al. (2015) confirm that CroSolver is sufficiently robust as to input parameters (slope gradients, roughness coefficient). One of its disadvantages however is impossibility of choosing the schematic shape of watercourse channel cross section.

The tool currently uses schematization to a trapezoid. Nevertheless, this shape cannot characterize natural channels. Podhoranyi and Fedorcak (2014) inform that the influence of the shape used for schematization on the results of modelling has not been clearly demonstrated so far. Complications can be brought also by objects on the watercourse, which CroSolver currently cannot work with satisfactorily. On the other hand, Roub et al. (2015) expect the tool accuracy to improve along with the improving accuracy of DRM input data.

Other error sources include inaccurately measured discharge used for the software recessing. Moreover, the ALS based Digital Relief Model is very heavy in terms of data volume, and the factor may show to be limiting in working with a large area. In this respect, it would be

possible to reduce appropriately the use of TIN without impairing its accuracy (Roub et al., 2012a).

5. Conclusion

The submitted paper aims at a comparison of outputs from the hydrodynamic model, based on two options of computational geometry: (1) cross profiles obtained from DRM based on 5G DRM data, (2) cross profiles obtained from DRM with the included watercourse channel recessed by using the CroSolver tool.

The above-mentioned results indicate that outputs from the hydrodynamic model based on 5G DRM are –as expected- overestimated as compared with the recessed model. These differences are most apparent for lower discharges (Q_1 and Q_5) on both concerned watercourse sections. By contrast, differences for Q_{50} and Q_{100} are negligible. These results are corresponding with respect to the fact that a lower influence of discharge reached during ALS (used for recessing) was assumed at higher modelled discharges.

The differences were obvious when comparing the two monitored localities. While the differences of all characteristics on the Otava River were relatively insignificant with respect to the watercourse size, the differences on the Úhlava River were greater. This was due to the effect of terrain morphology when the deeply incised Otava R. channel does not practically allow spill into the inundation area whereas the Úhlava River floods nearly the entire inundation area after bank overflow. Thus, the significance of the CroSolver tool shows most in the results for inundation as well as where a sufficient channel capacity can be expected thanks to recess for converting the required discharge.

The results of our work demonstrate that the CroSolver tool has a good potential for use. Further research could be focused on comparing the recessed models directly with models based on geodetic measurements, possibly with the readout of discharge measured at the time of scanning. At the same time, a more extensive comparison would be useful of the influence of watercourse morphology and size on resulting differences at using the CroSolver tool.

Acknowledgment

The results reported in this text were obtained with the support of the Czech Technology Foundation, programme Alpha, project TA02020139 – Use of hydrological measurements in the schematization of watercourse channels for hydrodynamic model purposes based on aerial laser scanning data.

References

Bharat, L. and Mason, D.C. (2001) Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, 100–120.

Brázdil, K. (2009) Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. *Geodetický a kartografický obzor*, 55 (97), č. 7, 145–151.

CroSolver (2014) CroSolver for ArcGIS, Nástroj CroSolver pro práci v prostředí ArcGIS, Ver 1.0 – Manual. online: <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>, cit. 9. 3. 2015.

ČHMÚ, (2015a) Evidenční list hlásného profilu Písek,

online: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307230, cit. 18. 2. 2015.

ČHMÚ, (2015b) Evidenční list hlásného profilu Přeštice,
Online. http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=2505279, cit. 7. 3. 2015.

Dolanský, T. (2004) Lidary a letecké laserové skenování. *Acta Universitatis Purkynianae*, 99, *Studia geoinformatica*. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, ISBN 80-7044-575-0.

Drbal, K., Štěpánková, P., Levitus, V., Říha, J., Dráb, A., Satrapa, L., Horský, M., Valenta, P., Valentová, J., Friedmannová, L., (2012) Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Ministerstvo životního prostředí, 91 s. online: http://cde.chmi.cz/dokumentace/Metodika_mapovani_2012-03-13.pdf (cit. 24. 3. 2015).

Ernst, J., Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., and Piroton, M (2010) Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55 (2), 181–209.

HEC, (2010) HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, CA.

Charlton, M. E., Large, A. R. G., Fuller, I. C., (2003) Application of airborne lidar in river environments: the river Coquet, Northumberland, UK, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 299-306.

Lindenschmidt, K.E. (2008) Quasi-2D approach in Modeling the transport of contaminated sediments in floodplains during river flooding. Model coupling and uncertainty analysis. *Environmental Engineering Science*, 25 (3), 333–351.

Metodický pokyn (28181/2005-16000) k zadávání fotogrammetrických činností pro potřeby vymezení záplavových území v souvislosti s aplikací ustanovení § 66 odst. 1 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a vyhlášky č. 236/2002 Sb., o způsobu a rozsahu zpracování návrhu a stanovování záplavových území.

Novák, P., Roub, R., Hejduk, T. (2011) Využití hydrologického měření při tvorbě hydrodynamických modelů z dat leteckého laserového skenování. *Vodní hospodářství*, 61 (8), 297–302. ISSN 1211-0760.

Oršulák, T., a Pacina J., (2012) 3D modelování a virtuální realita. Ing. Tomáš Kukulenka, Ústí nad Labem.

Pavelka, K., (2009) Fotogrammetrie 1. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha, 200.

Podhoranyi, M., and Fedorcak, D., (2014) Inaccuracy introduced by Lidar-generated gross sections and its impact on 1D hydrodynamic simulations. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, issue 1, 1-11.

Roub, R., Hejduk, T., Novák, P., (2012a) Využití dat z tvorby nového výškopisu území České republiky metodou leteckého laserového skenování při analýze a mapování povodňových rizik. *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 58/100, 4-8.

- Roub, R., Hejduk, T., Novák, P. (2012b): Automating the creation of channel cross section data from aerial laser scanning and hydrological surveying for modeling flood events, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60 (3), p. 227–241.
- Roub, R., Urban, F., Havlíček, V., Novák, P., Hejduk, T., Bureš, L. a Reil A., (2015) Vývoj softwarových nástrojů CroSolver a CroSolver for ArcGIS pro přípravu výpočetní tratě hydrodynamických modelů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* 1/2005, ročník 57, 5-13.
- Valenta, P. (2005) Využití numerických modelů proudění vody v protipovodňové ochraně. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- Valentová, J., Valenta, P., and Weyskrabová, L. (2010) Assessing the retention capacity of a floodplain using a 2D numerical model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (4), 221–232, ISSN 0042-790X.
- Wehr, A., and Lohr, U., (1999) Airborne laser scanning – an introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82.

7. KOMENTÁŘ

Povodně představují pro Českou republiku největší přímé nebezpečí v oblasti přírodních katastrof, neboť toto území nepatří mezi regiony, kde se projevují seismické a vulkanické děje anebo povětrnostní extrémy typu tornád a hurikánů. Povodně však jsou příčinou závažných krizových situací, které provázejí nejenom rozsáhlé materiální škody, ale rovněž ztráty na životech obyvatel postižených území a rozsáhlá devastace kulturní krajiny včetně ekologických škod.

Velké povodně přinášejí škody a utrpení postiženým, jsou však také zdrojem poučení pro budoucnost. Ve druhé polovině 20. století nám povodně příliš nových poznatků nepřinesly, tato generace jakoby přestávala vnímat povodňové nebezpečí. Až do roku 1997, kdy Morava a Slezsko byly zasaženy katastrofální povodní a o 5 let později následovala velká povodeň v Čechách.

Od té doby se výskyt velkých povodní zvýšil a do současné doby jsme zaznamenali celkem 8 takových ničivých událostí, při kterých přišlo o život 123 lidí, a škody přesáhly 174 mld. Kč.

Při lokalizaci povodňových situací na mapu území České republiky lze konstatovat, že pouze nejzápadnější část území (v horních částech povodí Ohře a Vltavy) nebyly postiženy, zatímco mnohá území v povodí Moravy, Labe a Vltavy zasáhly povodně opakovaně.

Již výše zmiňovaná povodeň v roce 1997 a následující povodeň v roce 2002 daly svou silou a ničivými následky vzniknout novým zákonům a mnoha orgánům krizového řízení. Upozornily také na nutnost protipovodňových opatření a dokonalejšího propracování plánů záplavových území.

Za dobu, co se potýkáme s povodněmi, došlo k razantnímu vývoji v jejich předcházení a ochraně před nimi. Přesto se problematika povodní stává stále aktuálnějším tématem s ohledem na zkušenosti z posledních let.

Z tohoto důvodu je věnována velká pozornost opatřením k ochraně před povodněmi, která mají takové situace předvídat, eliminovat jejich potenciál a organizačně je zvládat. Hlavním cílem ochrany před povodněmi je v dlouhodobém hledisku ochrana sídel.

Současný stav ochrany před povodněmi je do jisté míry v České republice ovlivněn skutečností, že před rokem 1997 nebylo naše území poměrně dlouho postiženo povodní se skutečně katastrofálními následky na větší části území republiky. Tím došlo k podcenění nebezpečí vyplývající z možných povodní a toto podvědomí vedlo jednak ke zvýšení rizika škod při využívání území v údolních nivách a jednak k oslabení významu budování dalších

preventivních opatření na ochranu před povodněmi. Prakticky úplně bylo potlačeno využívání a posilování možností využít netechnická preventivní opatření.

V průběhu přípravy a realizace technických protipovodňových opatření trvale probíhají diskuse a porovnávání s opatřeními přírodě blízkých – tedy opatření, která mají vést ke zvýšení retence vody v půdním profilu příslušného povodí, k retardaci odtoků srážkových vod z povodí úpravou hospodaření v krajině nebo k umožnění rozlivů v údolních nivách. Dalším opatřením jsou revitalizační úpravy koryt vodních toků, především meandrování a mnohá z těchto opatření slouží jako zmírnění změn, které nepříznivě působí na realizování technických opatření.

Jak již bylo opakovaně v odborné literatuře prokázáno, zvýšení retence v půdním profilu má své limity a může pozitivně působit za určitých okolností a navíc vliv se promítá pouze pro malé povodně (Q10 – Q20). Jejich zavádění však může výrazně ovlivnit rozsah eroze při odtocích ze svažitého terénu, což je velmi žádoucí pozitivní přínos. Problémem zůstává, že téměř stoletá absence velkých povodní na území ČR vedla k rozvoji zástavby v údolních nivách. Historická zástavba v údolní nivě nenabízí příliš možností k otevření rozlivů. Určitým řešením je realizování suchých nádrží – poldrů, do kterých lze řízeným rozlivem část povodňových objemů vody zachytit a po odeznění hlavní povodňové vlny je postupně vypouštět. Jejich výstavby sice naráží na obtížné vypořádání majetkoprávních vztahů, jsou určitou možností technického řešení. O údržbu poldru jako vodního díla je však nutno trvale pečovat, aby byl spolehlivě připraven k zachycení významných objemů povodňové vlny bez nebezpečí poškození.

Malé vodní nádrže mají většinou méně významnou retenční schopností a slouží k zachycení především malých povodní. Nicméně transformace povodní těmito malými nádržemi pomáhá alespoň v lokálním měřítku získat čas k aktivizaci ochrany níže na toku. Lokální protipovodňová opatření slouží k ochraně jednotlivých sídel a ty jsou zodpovědné za jejich realizaci. Úlohou státu je koordinovat výstavbu obou typů opatření pomocí systematického vodohospodářského a územního plánování tak, aby nezhoršovaly průběh povodní dále podél toku.

Využití kombinace technických a přírodě blízkých opatření je vhodné a žádoucí, i když realizovaná řešení mají dopady na snížení rozsahu větších povodní.

Je však skutečností, že rozhodující efekty na omezení povodňových škod mají opatření technická, která lze výrazně rychleji realizovat než opatření přírodě blízká. I když u technických opatření se problémy s majetkoprávním vypořádáním rovněž objevují, avšak jsou rozsahem potřebných pozemků výrazně menší.

Ochrana před povodněmi nemůže být nikdy absolutní a její úroveň je dána nejen finančními a možnostmi státu a chráněných subjektů, ale i efektivností možných protipovodňových opatření.

U větších toků budou převažovat spíše protipovodňová opatření na vodních tocích a jeho okolí, ale na menších vodních tocích, kde je hlavní nebezpečí z přívalových povodní, se budou hledat a převažovat i další jiná opatření. Bude se jednat o kvalitní předpovědní povodňovou službu, lokální hlásné a varovné systémy, kvalitní povodňové plány a v neposlední řadě i rozumná činnost v oblastech náchylných ke vzniku povodní. Významnou úlohu v ochraně před povodněmi má i objektivní vyhodnocení povodňových událostí, vhodně nastavená legislativní pravidla a objektivní hodnocení povodňových rizik.

Hlavními prostředky, které měly ochranu před povodněmi řešit, byly podle Strategie ochrany před povodněmi pro území České republiky zejména:

- úprava a zvýšení kapacity koryt vodních toků s cílem dosáhnout co největší ochrany zastavěných území včetně ochrany zemědělských pozemků,
- technická opatření na vodních tocích a v inundačních územích často orientovaná na zajištění rychlého odvedení vody,
- předpovědní a hlásné systémy (hydrometeorologická předpověď apod.),
- sestavování povodňových plánů územních celků s vymezením účasti záchranné služby apod.

Tato opatření a činnosti byly v podstatě organizovány státní správou ve spolupráci se státními subjekty, bez širšího zapojení veřejnosti a bez uplatnění zájmu uživatelů území. Kromě toho lze uvést podle Strategie ochrany před povodněmi pro území České republiky nedostatky, které se promítly do současné situace v oblasti před povodněmi, především:

- chybějící systém zodpovědnosti a financování opatření proti povodním,
- chybějící systémový a komplexní přístup k plánování preventivních opatření proti povodním,
- nedostatečné vymezení záplavových území, jejich nedůsledná ochrana a nedostatečná regulace jejich využívání,
- chybějící riziková analýza pro posuzování potenciálních povodňových škod a srovnání výdajů na realizaci opatření,
- nevhodně prováděná ochranná opatření, která často vedla k vyloučení přirozených inundací a ke zhoršení povodní v dolních částech toků,
- nedostatečné vybavení a omezený rozvoj techniky pro předpovědní službu.

K největším nedostatkům v preventivní ochraně před povodněmi patří skutečnost, že záplavová území byla stanovena pouze podél malé části délky významných vodních toků. Podobně i komplexní systémový přístup k návrhům a realizaci preventivních technických a netechnických opatření nebyl prakticky uplatňován. Z tohoto důvodu jsou od roku 1998 za výrazné zahraniční spolupráce a pomoci zaváděny moderní metody matematického modelování povodňových vln a jejich průběhu s možností ověřovat nejen rozsah záplav, ale rovněž posuzovat účinnost uvažovaných opatření na ochranu.

S ohledem na zavádění moderních metod v hydrologii bylo potřeba provést posouzení navržených protipovodňových opatření také matematickým modelem. V případě navržených protipovodňových opatření v lukách u Příchovic byly vypočítány dvě varianty odtokového a hladinového režimu lišící se ve způsobu zadávání parametrů vodního toku, průlehových inundačních koryt a přilehlé oblasti.

Podle Studie proveditelnosti jsou protipovodňová opatření navržená proti stoleté vodě. Hydraulickým modelem bylo vypočítáno, že protipovodňová opatření jsou navržena jako opatření se stupněm protipovodňové ochrany Q20. Hydrotechnickým posouzením byly také dokázány rozdíly při použití jednoduchých hydrotechnických výpočtů a při použití matematických modelů.

Pro město Přeštice je potřeba provést úpravy v krátkém časovém horizontu v kritickém úseku vodního toku Úhlavy. Dále je třeba provést ohrázení levého břehu v délce zhruba 700 m a upravit pravý břeh v délce 450 m. Na navržené hrázce při levém břehu je možnost vybudovat pěší a cyklistickou zónu vhodnou k zlepšení kulturního prostředí města a okolí.

V dlouhodobějším časovém horizontu realizace inundačních průlehových koryt v lukách u Příchovic, které by během povodní pomohly rozdělit průtok a zrychlily by odtok městem.

Pomocí matematických modelů lze provádět řadu simulací proudící vody v průběhu povodní s kulminačními průtoky odpovídajícím N-letým vodám. Dále dokážou vyhodnotit odtokové a hladinové poměry posuzované oblasti, např. průběh hladin, hloubek a velikost rychlostí proudící vody. Modely poskytují přehledné informace o charakteristickém proudění v libovolném místě modelové oblasti a umožňují provedení kvalifikované analýzy hydrologických poměrů v inundačním území při povodňových situacích.

Návrhový stupeň odpovídá návrhovému stupni protipovodňové ochrany sídel dle Koncepce ochrany vod Plzeňského kraje, která vychází vždy z potenciálních povodňových škod pro velké vody s periodicitou v rozsahu minimálních a maximálních hodnot. Jejich vyčíslení pro jednotlivá sídla je ovšem poměrně náročné, lze však řádově odhadnout ze zkušeností z povodní 2002

a 2003, kterými byl Plzeňský kraj zasažen a které se pohybovaly v řádech miliard Kč. Dimenze a druh navrhovaných protipovodňových opatření jsou v zásadě podřízeny cílovému stavu, vycházejícímu především z poučení z historických povodní. Stupně povodňové ochrany jsou uvedeny pro jednotlivá území v následující tabulce.

Typy území	Stupeň povodňové ochrany
centra měst, sídliště, historicky významné celky, průmyslová aglomerace	Q100
souvislá zástavba v obcích	Q50
rozptýlená a rekreační zástavba	Q20

Zdroj: Koncepce 2004

Tab. 1: Stupně povodňové ochrany pro různé typy území

Vzhledem k tomu, že navržená protipovodňová opatření v lukách u Příchovic mají za cíl ochránit spodní část města Přeštice, kde se nachází rozptýlená zástavba a zahrádkářská kolonie určená pro rekreační účely, lze konstatovat, že stupeň povodňové ochrany navržených protipovodňových opatření podle hydraulického posouzení je v souladu s Koncepcí ochrany vod Plzeňského kraje.

Zvýšení stupně protipovodňové ochrany je převážně veřejným zájmem. Zvolená míra zabezpečení nebude nikdy absolutní a souvisí nejen s technicko-ekonomickým hodnocením navržených opatření, ale i přípustnou mírou ovlivnění životního prostředí.

Pro zlepšení současného nevyhovujícího stavu ochrany proti velkým povodním, který netechnickými prostředky nelze efektivně a uspokojivě řešit, by na základě odhadu a za předpokladu přiměřené úrovně ochrany bylo nutné vynaložit 10-30 mld. Kč v období cca 10 let. Před rozhodnutím o způsobu ochrany a volbě varianty optimální kombinace protipovodňových opatření, které vyplyne z posouzení jejich účinnosti na základě využití matematických simulačních modelů, bude prováděna riziková analýza pro zjištění jejich efektivnosti a posouzení jejich vlivu na dané území a životní prostředí. Teprve poté bude možné zodpovědně rozhodnout o způsobu a míře ochrany. Tyto zásady se budou řešit v systému vodohospodářského plánování a promítnou se do územních plánů.

Pro vznik povodní v podmínkách České republiky jsou v naprosté většině případů rozhodující meteorologické příčinné jevy, jejichž důsledky se projeví přímo na území státu. Povodně přicházející ze sousedních států se mohou vyskytovat ve významnějším rozsahu pouze

na Dyji a částečně na horní Lužnici. Významné je i ohrožení území České republiky v důsledku povodňových situací na Ohři přítoky z území Německa a na Olši a Stěnavě přítoky z Polska. Vedle meteorologických jevů je pro povodňové situace druhým hlavním určujícím faktorem i způsob využití a nakládání s pozemky v jednotlivých povodích.

Zvyšování retence vody v krajině je možné prostřednictvím správně navržených protierozních a protipovodňových opatření. Tato opatření se v praxi nejčastěji navrhuje jako společné opatření komplexních pozemkových úprav (Podrázský et Remeš, 2005).

Správně navržená a dimenzovaná protierozní opatření mají multifunkční účinek. Nejen omezují smyv půdy, ale zpomalují povrchový odtok a zvyšují retenci vody v krajině (Podrázský et Remeš, 2005).

Neuvážené zásahy v údolní nivě způsobují snížení retence v těchto inundačních územích. Vopálka (2003) uvádí, že bez existence propracovaného informačního systému a komplexního pojetí problematiky krajiny, je seriózní řešení povodňové ochrany nezvládnutelné.

Výskyt řady katastrofálních povodní v Evropě v posledních 15 letech (postiženo Bulharsko a Rumunsko) vede k výraznému zaměření vodohospodářských politik na zlepšení ochrany před povodněmi a realizaci protipovodňových opatření ke snížení povodňových škod.

V souvislosti se zvýšenou četností extrémních hydrologických situací, které postihly ČR v několika posledních letech, se jako jedna z příčin vzniku odtokových extrémů často uvádí právě snížení retenční a akumulární funkce krajiny. Snížená retenční schopnost území se projevuje jako důsledek dlouhodobě nevhodného způsobu využívání území, který je způsoben především rostoucím tlakem na zastavění inundačních území, kde standardně jinak dochází k retardaci a akumulaci odtoku (Bičík et al., 2008; Trimble, 2003). Analýza změn ve vývoji využití území je předmětem zájmu řady autorů (Skaloš et al., 2011). Inundace, retardační a akumulární prvky v krajině tvoří tzv. retenční potenciál krajiny, který ovlivňuje schopnost území transformovat příčinné srážky na odtok, určuje jeho průběh a kulminaci a současně ovlivňuje i další transport látek, uvolněných např. erozními procesy (Magunda et al., 1997). Retence v povodí je dána především různým uplatněním a funkcí retenčních a akumulárních prvků při výskytu příčinného deště různého typu (déšť přivalový, regionální) v závislosti na velikosti zasaženého území a aktuálním fyzikálním, resp. technickém stavu retenčních prvků v době výskytu deště (Mahe et al., 2005).

Z hydrologického hlediska je třeba v krajině podporovat především tzv. malý oběh vody. Malým oběhem se míní výpar vody z povrchu a jeho spád v podobě srážek, které se odehrávají

v rámci jednoho území v krajině. Význam malého oběhu vody v krajině je především v tom, že zadržuje vodu, a tím přispívá k vyrovnávání mikroklimatu (Petříček et Cudlín, 2003).

Petříček a Cudlín (2003) rovněž ve své práci uvádějí, že samotná retenční schopnost krajiny je daná její schopností zadržet vodu a tím zpomalit odtok srážkových vod z území. Pod tímto pojmem je možné rozumět dočasné zadržení vody na vegetaci, objektech v povodí, zadržení vody v pokryvné vrstvě povrchu půdy, v půdě samotné, mikrodepresích, poldrech a v tzv. bezodtokové fázi srážkově - odtokového procesu. Tato krajinná funkce přispívá k vyrovnanějšímu hydrologickému cyklu (menší výskyt extrémních stavů - povodně, sucha) a k menšímu odplavování živin.

Významný vliv na retenční schopnost krajiny mají krajinné prvky, jako jsou lesní ekosystémy, přirozené vodní toky a nivy, louky, mokřady, meze, zasakovací pásy atd. Odstraní-li se z krajiny tyto prvky, dochází k rychlému odtoku vody, k erozi, k zatěžování vodních toků splavenou půdou s vysokým obsahem živin, ale taky k výraznému poklesu zásob podzemní vody. Efektivní formu zadržování vody v krajině představují mokřadní biotopy, prameniště, rašeliniště, tůně, litorály rybníků, říční nivy, podmáčené smrčiny apod. (Mauchamp et al., 2002) Svým působením se podílejí na tlumení průtokových extrémů a transformaci povodňové vlny. Mokřady chrání krajinu před záplavami, protože vytvářejí prostor, který v čase povodňových průtoků umožňuje zachytit a akumulovat vodu.

Kvantifikace retenčního účinku technických PPO je v současnosti již dobře propracována (Weyskrabová et al., 2010).

Vzhledem k tomu, že v minulosti bylo přistoupeno na některých lokalitách k provedení plošného odvodnění systematickou drenáží je nutné vzít v úvahu možnost ovlivnění hladiny vody ve vodním toku vlivem odtoku z drenážních systémů.

Drenážní odtok je zvláštním případem mělkého podpovrchového odtoku. Pokud podíl odvodnění povodí vykazuje vysokou hodnotu, přibližně přes 30 %, může být za určitých odtokových podmínek také zvýšen podíl složky drenážního odtoku na odtoku celkovém. Obecně však platí, že podíl drenážních vod je nízký u významné srážko-odtokové epizody, to znamená, že odvodnění výrazně nezhoršuje povodňové stavy. Některé studie dokládají pozitivní přínos drenáže snížením povrchového odtoku při určitých, časově vymezených, středně intenzivních srážkách. Podíl drenážních vod je vyšší v období sušším a někdy může v delším období beze srážek odtékat z povodní drobného vodního toku po určitý čas pouze voda drenážní (Kulhavý et al., 2007).

Matějčec a Hladný (1999) uvádějí, že při povodních v roce 1997 odvodnění pozemků výrazně nezhoršovalo průběh povodňové situace a jejich vliv se vytrácel s dobou trvání povodně. Bylo konstatováno, že působení melioračního detailu tedy mělo nepodstatný celkový vliv.

Vysoké materiální škody a ztráty na lidských životech po povodních, které v poslední době opakovaně postihují naše území, ukazují na nutnost být na tento hydrologický extrém připraven. Je ale třeba si také uvědomit, že povodně nezpůsobují jen negativa, ale mají mnohdy pozitivní přínos. Určitým směrem v protipovodňové ochraně by mělo být naučit se s povodněmi žít a respektovat vodu jako živel, který nejen přináší užitek, ale je někdy také hrozbou.

Poučení z nedávných povodních. Jedním z důležitých poučení je, že je nutné zcela reálně očekávat povodně s větší extremitou než tou, která je vyjádřena dlouhodobě průměrnou dobou opakování 100 let. Je třeba zjistit, jaká rizika tyto povodně mohou přinést a připravit se na ně.

Pro účinné řízení všech prováděných opatření za povodní je třeba mít pokud možno rychlé, přesné a spolehlivé informace o příčinných povodňových jevech, zejména o srážkách, vodních stavech a průtocích a jejich dalším očekávaném vývoji. Dalším poučením bylo uvědomění si nutnosti zpětné vazby mezi předpovědním pracovištěm a uživateli předpovědi.

Obecně formulovaným poučením pro povodňové a krizové orgány i další zapojené složky na všech úrovních je však to, že musí být na povodňovou situaci připraveny, a to i na situaci extrémní, málo pravděpodobnou. Zcela zásadní je příprava kvalitních povodňových plánů, které nesmí být pouze formálním dokumentem, ale musí zahrnovat konkrétní opatření prováděná v závislosti na stoupání hladiny vody v hlásných profilech nebo jiných indikátorech stupně povodňové aktivity, případně na jejich předpovědích. Nabádá k důslednějšímu prosazování zásad povodňové prevence v záplavových územích. Nezbytné je výrazné posílení úlohy územního plánování a rozhodování stavebních úřadů ve spolupráci s vodoprávními úřady a správci povodí při povolování staveb v území ohrožených povodněmi a při usměrňování využívání záplavového území.

Preventivní protipovodňová opatření jsou ve smyslu vodního zákona opatřeními ve veřejném zájmu, na které stát může poskytnout finanční prostředky. Obvykle slouží více ohroženým subjektům.

Zvýšený výskyt povodní a tedy zvýšení míry povodňového rizika je často předpokládaným důsledkem očekávaných klimatických změn. Zejména v případě povodní však dosavadní studie nebyly schopny poskytnout jednoznačný a metodicky správně odvozený závěr, zda se v oblasti střední Evropy míra povodňového rizika povodňový režim změní.

Změny ve využití území, stejně jako úpravy údolní nivy nebo koryt toků představují důležitý prvek zranitelnosti v systému povodňového rizika, kde mají význam jak z hlediska bezprostředního ovlivnění průběhu povodně, tak z hlediska využití přirozeného retenčního a transformačního potenciálu krajiny.

Ukázaly, že změny využití území i antropogenní úpravy údolní nivy a koryt toků mohou významně ovlivňovat průběh a následky povodně v lokálním měřítku i v měřítku povodí jako celku. Mezi úpravy, které nejvýrazněji ovlivňují průchod povodňové vlny a výskyt povodňových následků patří změny v charakteru využití území údolní nivy a přípobřežní zóny a překážky proudění.

Vliv těchto úprav na celkovou extremitu povodňové události a jejich následků je však omezený a nepředstavuje zásadní složku povodňového rizika. Jednotlivé typy úprav navíc mají odlišný účinek při rozdílné extremitě a průběhu povodně i v různém prostředí. Metody terénního mapování, geoinformatické analýzy a matematického modelování umožnily identifikovat kritické prvky říční sítě, kde antropogenní zásahy mohou způsobit výrazný nárůst povodňových škod a zároveň kde je možné využít přirozeného potenciálu krajiny k tlumení jejího průběhu.

Výsledky studií ukázaly na měnící se význam různých typů změn v krajině a úprav toků vzhledem k rozdílné extremitě povodňové události.

Faktory, jejichž význam klesá s extremitou povodně představují zejména úpravy trasy toku, stejně jako úpravy dna, břehů a přípobřežní zóny. Ovlivnění průběhu povodně těmito ukazateli je nejvyšší u malých až středních povodní, případně u povodní z přívalových srážek. Naproti tomu u povodní s vysokou dobou opakování, zapříčiněnými regionálními dešti nebo táním sněhu je vliv těchto činitelů marginální.

Naproti tomu úpravy podélného profilu, tj. jezy a stupně v korytě a zejména výskyt potenciálních překážek proudění v toku představují typ úprav, jejichž význam roste s extremitou povodně. Výsledky terénního mapování následků povodně 2002 ukázaly, že jezy a stupně v korytě toku představují zpravidla ohniska zvýšené intenzity erozní a akumulární činnosti toku při povodni.

Faktor, který se ukázal jako významný pro rozsah i charakter následků nedávných povodní je naopak intenzita využití údolní nivy. Stavby, představující potenciální překážky proudění při povodni jako např. násypy komunikací protínající údolní nivu, nedostatečně dimenzované mosty a propustky výrazně přispěly k akceleraci povodňových škod. Z hlediska povodňových škod mají mimořádný význam zejména překážky proudění, tj. nevhodně umístěné či nedostatečně dimenzované objekty v údolní nivě a v korytě toku. Jako výrazně negativní

se potvrdil i vliv intenzivního zemědělského využití údolní nivy, které díky nadbytečné ochraně nivy před rozlivem brání účinnější transformaci povodňové vlny. Při zapojení údolní nivy do odtoku při extrémních povodních navíc proudění ovlivňují objekty, které jsou jinak mimo záplavovou oblast a které mohou významně zhoršit průběh povodně. Jde zejména o nedostatečně dimenzované mosty a propustky, budovy v údolní nivě a o tělesa železnic a silnic, vedoucí napříč údolní nivou.

V současné době neexistuje v ČR kvalitní a dostatečně podrobný mapový podklad, který by vhodně vyjadřoval příčný profil koryta v celé délce sledovaného vodního toku pro užití v hydrodynamických modelech. Pro zpracování hydraulických výpočtů pomocí numerických modelů, pro vyhodnocení výsledků simulací i pro zpracování navazujících rizikových analýz jsou kombinovány tři uváděné základní způsoby pořízení těchto dat (geodetické zaměření příčných profilů, letecké laserové skenování, fotogrammetrie).

Pro reálnost a kvalitu modelování povodňových jevů a stavů s využitím hydrodynamických modelů jsou určující vstupní data pro tvorbu výpočetní geometrie vodního toku.

Příspěvek III vychází z využití výškopisných dat získaných metodou leteckého laserového skenování (LLS), které v současnosti rovněž zabezpečuje Český úřad zeměměřický a katastrální ve spolupráci s Ministerstvem obrany ČR. Data LLS představují první složku uvažovaného principu. Druhou složkou technického řešení je využití hydrologického měření. Hydrologické měření je v ČR v kompetenci Českého hydrometeorologického ústavu a podniků Povodí. V současnosti je na území ČR v provozu cca 494 stanic s hydrologickým měřením na významných vodních tocích, které poskytují adekvátní předpoklad k úvaze o využití stanovených hodnot průtoků, dosažených v době pořizování dat LLS, při tvorbě korektní geometrie pro hydrodynamický model.

Pro oblast modelování vodních toků a pro zaměření jejich koryt a příčných profilů jsou v současné době používána data nejčastěji z geodetického zaměření. Pro mapování inundačních území se využívají data pořizovaná leteckou fotogrammetrií. Nejmodernější metodou pořizování těchto dat na území České republiky je letecké laserové skenování zemského povrchu. Jedná se o digitální modely reliéfu. Poslední takový model České republiky je vytvořen 5. generací digitálního modelu reliéfu (DMR 5G).

Jestliže se geodetické zaměření provede správně, vyznačuje se vysokou přesností, což je důležitý předpoklad.

Zaměření příčných profilů ve velkých vzdálenostech od sebe je pro použití v hydrodynamických modelech velmi limitující. Nemůže tak být přesněji popsána členitost toku a jeho jistá meandrovitost v terénu. Dále je tím zkrácen jeho příčný profil, zejména ve spodní části toku, a tím byl zvýšen podélný sklon.

Problematika výškopisných dat a jejich použití v souvislosti s modelováním vodních toků a povodňových analýz je dlouhodobé téma. Nejzákladnější otázkou je, zda používat geodeticky zaměřená data, která se vyznačují tím, že jsou nejpřesnější, pokud je měření provedeno správně, ale na druhou stranu jejich sběr je nejpomalejší a asi i nejdražší. Nebo zda využít rychlejší, cenově dostupnou metodu leteckého laserového skenování. Hlavní roli při pořizování těchto výškopisných dat totiž jistě hraje kvalita, dostupnost a v neposlední řadě cena, ale také celistvost.

V přímém porovnání geometrických vstupů do modelu bylo zjištěno, že dochází na podkladech LLS ke schematizaci příčných profilů koryta. Je tak oproti geodetickému zaměření nepřesná. Hlavní nedostatek je zapříčiněn neprostupností laserových paprsků vodní hladinou, které se od ní odrážejí, takže získané body na toku jsou vlastně kótami vodní hladiny.

K největším rozdílům ve výškách hladin dochází, jak bylo zjištěno porovnáním výsledků modelů, když tok prochází úzkým prostorem, například úzkým zařízlým údolím. Odstraněním tohoto problému může být dodatečné zahloubení koryta.

Řešení odečtením průtoku, který byl zjištěn v daném toku během pořizování dat LLS, pozitivně ovlivní výsledky, ale jen do jisté míry, a to u malých průtoků. S většími průtoky se postupně efekt odečtení průtoku ztrácí. Pokud dojde k vybřežení vody do širokého území i z geodeticky zaměřeného koryta, začínají se hodnoty nadmořských výšek a tím i šířek hladin postupně vyrovnávat, což mě přivádí ke zvážení možnosti použít data z DMR 5G spíše k mapování inundačních území, kde by mohly, díky své přesnosti a relativní jednoduchosti práce s nimi, nahradit leteckou fotogrammetrii.

Letecké laserové skenování, ale i pozemní se těší v poslední době velkému zájmu. Prochází obrovským vývojem, který je zaměřen především na zvyšování hustoty bodů, jak v horizontálním, tak vertikálním směru, ale i neustálého zpřesňování souřadnic jednotlivých bodů.

Hrádek a Sobota (1999) uvádějí, že státní monitorovací síť povrchových vod je tvořena vodoměrnými stanicemi situovanými převážně na významných vodních tocích. V podmínkách ČR zaujímají významné vodní toky 22 % celkové délky hydrografické sítě. Přestože tak větší část hydrografické sítě ČR (78 % celkové délky) představují drobné vodní toky, jsou pro ně jen výjimečně k dispozici soustavná hydrologická pozorování. Tato skutečnost není ovšem

s ohledem na možnost uplatnění hypotézy o syntéze dat LLS s daty z hydrologického měření pro tvorbu výpočetní geometrie limitující, poněvadž struktura této sítě pokrývá významné vodní toky a jejich povodí tak, aby za pomoci hydrologické analogie (Plate, 2002; Giannoni et al., 2003; Fowler et al., 2005) umožňovala zpracování hydrologických charakteristik pro libovolné místo v říční síti.

Průtok vody představuje základní hydrologickou veličinu vyjadřující objem vody, který proteče daným profilem vodního toku za jednotku času. Letecké laserové skenování povrchu patří k nejmodernějším technologiím pro pořizování prostorových geografických dat. Znalost těchto dvou poznatků vytváří v kombinaci vhodný předpoklad pro tvorbu relevantního digitálního modelu reliéfu (DMR) vstupujícího do hydrodynamických modelů. Vysoké finanční požadavky na geodetické zaměření příčných profilů koryta vedly k posouzení možností, jakým vhodným způsobem snížit vynakládané finanční prostředky na získání této informace. Byla alternativně možná možnost využít hydrologické měření při pořizování výškopisných dat LLS povrchu při sestavování jednotlivých simulačních epizod v hydrodynamickém modelu.

Provedené analýzy a matematické výpočty byly konstruovány tak, že kombinují pro finální podobu výpočetní geometrie data z hydrologického měření s daty leteckého laserového skenování.

Znalost míry povodňového nebezpečí patří k aktuálním problémům v celospolečenském měřítku. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES (povodňová směrnice) ukládá členským státům vytvořit plány pro zvládání povodňových událostí a stanovuje pevné termíny dílčích kroků řešení. K analýze a mapování povodňových rizik slouží simulace 1D a 2D hydrodynamických modelů, které poskytují detailní představu o působení povodně v konkrétním terénu. Reálnost a kvalita modelování povodňových jevů a stavů s využitím hydrodynamických modelů určují vstupní data pro tvorbu výpočetní geometrie vodního toku.

Jedním z nejdůležitějších podkladů pro hydrodynamické modely jsou vstupní data pro schematizaci koryta vodního toku. Získaná výškopisná data jsou rozhodující i při samotné volbě hydrodynamického modelu pro prováděné simulace. Méně náročnými modely z hlediska výškopisu území jsou jednorozměrné (1D) modely, kterým pro výpočet postačí příčné profily koryta a přilehlé inundace. V případě dvourozměrných (2D) modelů výpočet již vyžaduje detailní DMR, který přesně vystihuje morfologii sledovaného území. Na základě požadavků vstupních dat 1D a 2D modelů se odvíjí i finanční náročnost na pořízení těchto dat.

V České republice je nejrozšířenějším modelem HEC-RAS z několika důvodů, z nichž nejvíce převládá fakt, že je volně stažitelný. Jeho uživatelské prostředí je přívětivé, dokumentace

softwaru a použitých rovnic je obsáhlá a přehledná, pomocí doplňkového softwaru HEC-GeoRAS je možné připravit podklady a prezentovat výsledky v prostředí ArcGIS a další.

Topografická data pro potřeby hydrologických výpočtů jsou převážně data výškopisná, s důrazem na zachycení výškových poměrů v zájmovém území. Výškopis je reprezentován formou digitálního modelu reliéfu (terénu). Kvalita digitálního modelu reliéfu, charakterizovaná přesností a mírou detailu, zásadním způsobem ovlivňují přesnost a správnost výpočetních modelů.

DMR 5G je určen k analýzám terénních poměrů lokálního charakteru a rozsahu, např. při projektování pozemkových úprav, plánování a projektování dopravních, vodohospodářských a pozemních staveb, modelování přírodních jevů lokálního charakteru, apod. DMR 5G je základní zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek a počítačové vizualizace výškopisu v územně orientovaných informačních systémech vysoké úrovně podrobnosti.

Data z nového výškopisného mapování metodou LLS poskytnou pro celé území ČR požadovaný podklad pro povodňové analýzy ať již v kombinaci s geodetickým zaměřením koryt vodních toků, s využitím hydrologického měření pro snížení průtoků v modelovaných scénářích nebo s možností dodatečného zahloubení koryt vodních toků do DMR připraveného z dat LLS v kombinaci s daty z hydrologického měření.

Nově získané výškopisné informace naleznou uplatnění jako komplexní podklad pro řešení nejen vodohospodářské problematiky, ale i v ostatních oborech, pro které je znalost vertikální členitosti území rozhodující.

Hydrologická data vedoucí k zahloubení DMR z dat LLS poskytnou vytvořit hydrodynamický model, u kterého budou splněny všechny hydraulické podmínky a získané výstupy budou moci být použity při tvorbě map povodňového nebezpečí a povodňových rizik či navazujících rizikových analýz bez nutnosti zahrnout do modelu další zjednodušení, jako je například nutné při modelování povodňových scénářů se sníženým průtokem.

Jedním z hlavních důvodů je nedostatečná přesnost a vysoká míra generalizace současných digitálních modelů reliéfu, které neumožňují interpretovat objekty mikroreliéfu s požadovanou přesností. Aplikace metody LLS nabízí dosažení vysoké hustoty výškových bodů i výškové přesnosti, která v zásadě odpovídá současným i perspektivním požadavkům uživatelů geografických informací v ČR. Metoda LLS se oproti ostatním návrhům pro zlepšení databází výškopisu (využití digitální stereofotogrammetrie nebo automatizované obrazové korelace

překrývajících se měřických snímků) jeví ekonomicky a produkčně nejefektivnější, o čemž svědčí i její stále častější použití ve vyspělých zemích Evropy, USA a v Kanadě.

V datech LLS jsou velmi dobře rozpoznatelná koryta toků. Ukázalo se, že polohová přesnost současných dat vodních toků je v porovnání s daty LLS podstatně nižší.

LLS patří vedle klasického geodetického zaměření profilů koryta toku a údolních profilů a fotogrammetrického mapování inundací k základním metodám pořizování geodetických podkladů pro hydraulické modely. Stále rostoucí přesnost a hustota dat LLS si klade otázku, zda by mohla tato data alespoň částečně nahradit finančně a technicky náročné geodetické zaměření.

Nové výškopisné mapování metodou LLS přinese kvalitní výškopisné informace, které najdou uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Z pohledu vodního hospodářství umožní přesnost a hustota nových výškopisných dat rozvoj a aktualizaci dat stávajících. Kromě toho se otevře cesta různým automatizovaným metodám zpracování dat a grafických produktů.

Základem bude zpřesnění sítě vodních toků, včetně aktualizace jejich kilometráže. K identifikaci výškových objektů na i nad vodním tokem (tzn. stupně, jezy, mosty atd.) by mohl přispět automatický postup analýzy podélného profilu vodní hladiny. Data LLS se stanou základním z geodetických podkladů a budou hrát velkou roli při tvorbě map povodňového nebezpečí a rizika, které jsou požadovány Evropskou směrnicí. Z analýzy testovacích dat vyplývá, že po odstranění systematických chyb by data měla být vhodná pro určení geometrie inundace i koryta některých drobných vodních toků, kde je malá hloubka vody.

Geodetické zaměření bude potřeba v případě objektů na vodním toku, u koryt s nezanedbatelnou hloubkou vody a jiných specifických případech. Neoddiskutovatelný smysl bude mít přesný DMR při stanovení rozvodnic a ploch povodí, které jsou základem k určení objemu srážek.

Přesnost a hustota DMR z LLS umožní zpracování studií a plánovacích dokumentací pro přípravu retenčních nádrží (např. preventivní protipovodňová opatření, akumulace vody, atd.). DMR poskytne dostatečně podrobná data pro nejrůznější modelování v oblasti ochrany povrchových i podzemních vod.

Problémem, se kterým se bude potřeba při zpracování vypořádat, jsou obrovské objemy dat a tedy vysoké nároky na výpočetní techniku.

Pravděpodobně nebude možné řešit rozsáhlé oblasti a nutností bude data optimalizovat a členit je na menší celky.

Jako doplňková data lze využít data DMR 4. generace (DMR 4G). Jinak tato datová sada je pro účely přesného hydrologického modelování nevhodná. Hlavním nedostatkem je malý detail v oblasti toků – identifikace břehové linie a dalších terénních stupňů v blízkosti vodního toku.

8. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- AGGETT G. R. et WILSON J. P., 2009: **Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river.** *Geomorphology* 113, s. 21-34.
- BIČÍK I., LANGHAMMER J., ŠTYCH P. et KUPKOVÁ L., 2008: **Long-term land-use changes in Czechia as a flood risk influencing factor.** *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, Vol. 45, No. 1–2, p. 29–52.
- COBBY D. M., MASON D. C. et DAVENPORT I. J, 2001: **Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling.** *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56, 121– 138.
- CUNGE J.A., HOLLY F.M. et VERWEY A., 1980: **Practical Aspects of Computational River Hydraulics.** Pitman Publishing, London, 420 s, ISBN 273084429.
- ČÚZK, 2015a: **Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G).** online: http://geoportal.cuzk.cz/%28S%28wazapidbv5n1zhwhpptsahmr%29%29/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301, cit. 5. 4. 2015.
- ČÚZK, 2015b: **Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G).** online: <http://geoportal.cuzk.cz/%28S%28wnbabejxgbwnjlo3usatgnrr%29%29/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302>, cit. 5. 4. 2015.
- ČÚZK, 2015c: **Digitální model reliéfu České republiky 1. generace (DMP 1G).** online: http://geoportal.cuzk.cz/%28S%28iyar5evqwrsofa2jhuzr0pqxX%29%29/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=303, cit. 5. 4. 2015.
- DOLANSKÝ T., 2004: **Lidary a letecké laserové skenování.** *Acta Universitatis Purkynianae*, 99, *Studia geoinformatica*, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, ISBN 80 - 7044 - 575 – 0.

- DRBAL K. et kol., 2009: **Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik**. Ministerstvo životního prostředí, 87 s.
- DUŠÁNEK P., 2008: **Tvorba digitálních modelů z dat leteckého laserového skenování a jeho využití pro aktualizaci výškopisu ZABAGED**. Diplomová práce – Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. Vedoucí dipl. práce Ing. Markéta Potůčková PhD.
- FOWLER H. J., EKSTRÖM M., KILSBY C. G. et JONES P. D., 2005: **New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Assessment of control climate**. Journal of Hydrology 300, 212-233.
- GIANNONI F., SMITH J.A., ZHANG YU et ROTH G., 2003: **Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates**. Advances in Water Resources, Volume 26, Issue 2, pp. 195-203.
- HAVLÍK A. et kol., 2001: **Matematické modely v ochraně před povodněmi**. MŽP, ČVUT, Praha, 11s., ISBN 80-7212-198-7.
- HRÁDEK F. et SOBOTA J., 1999: **Prognózy maximálních průtoků v nepozorovaných profilech povodí drobných vodních toků**. In Workshop Extrémní hydrologické jevy v povodích. Praha, ČVUT, ČVHS, s. 82-85. ISBN 80-01-02072-X.
- HLADNÝ J., 2002: **Meteorologické a hydrologické syndromy povodňové situace v srpnu 2002**. In Workshop Extrémní hydrologické jevy v povodích. Praha, ČVUT, ČVHS, s. 13-26. ISBN 80-01-02686-8.
- **Koncepce ochrany vod - Studie protipovodňových opatření Plzeňského kraje** [online]. Plzeň, Portál Plzeňského kraje. [cit. 8. 4. 2009]. Dostupné z: <http://www.plzensky-kraj.cz/article.asp?itm=13712>.
- KUIPERS J. et VREUGDENHIL C.B., 1973: **Calculation of Two Dimensional Horizontál Flow**. DHL Report S-163-I, Part I, Delft.
- KULHAVÝ Z., SOUKUP M., DOLEŽAL F. et ČMELÍK M., 2007: **Zemědělské odvodnění drenáží**. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i, Praha.

- MAHE G. et SERVAT E., 2005: **The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso.** Journal of Hydrology. Vol.300, p. 33-43.
- MAUCHAMP A., CHAUVELON P. et GRILLAS P., 2002: **Restoration of floodplain wetlands: Opening polders along a coastal river in Mediterranean France, Vistre marshes.** Ecological Engineering, pp. 619-632, ISSN: 0925-8574.
- MAGUNDA M. K., LARSON W.E., LINDEN D.R. et NATER E.A., 1997: **Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall.** Soil Technol, vol. 10 (1), p. 57-67(11).
- MATEJÍČEK J. et HLADNÝ J., 1999: **Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky.** Ministerstvo životního prostředí, Praha. 60 s. ISBN: 80-7212-067-3.
- MERWADE V. M., MAIDMEND. R. et GOFF J. A., 2006: **Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry.** Journal of Hydrology 331, 731– 741.
- **Metodický pokyn (28181/2005-16000) k zadávání fotogrammetrických činností pro potřeby vymezení záplavových území** v souvislosti s aplikací ustanovení § 66 odst. 1 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a vyhlášky č. 236/2002 Sb., o způsobu a rozsahu zpracování návrhu a stanovování záplavových území.
- NOVÁK P., ROUB R. et HEJDUK T., 2011: **Využití hydrologického měření při tvorbě hydrodynamických modelů z dat leteckého laserového skenování.** Vodní hospodářství, 61 (8), 297–302. ISSN 1211-0760.
- ORŠULÁK T. et PACINA J., 2012: **3D modelování a virtuální realita.** Ing. Tomáš Kukulenka, Ústí nad Labem.
- PATERA A., VÁŠKA J., ZEZULÁK J. et ELIÁŠ V. [eds.], 2002: **Povodně: prognózy, vodní toky a krajina.** ČVUT, Fakulta stavební, Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, Praha, 436s., ISBN 80-01-02561-6.

- PETŘÍČEK V. et CUDLÍN P., 2003: **Máme bojovat proti povodním?** In: Životné prostredie, 4/2003, s. 177 – 179, Ústav krajinném ekologie SAV Bratislava. Dostupné z <http://www.seps.sk/zp/casopisy/zp/2003/zp4/index.html>
- PLATE E. J., 2002: **Flood risk and flood management.** Journal of Hydrology 267, pp. 2-11.
- PODHORANYI M. et FEDORCAK D., 2014: **Inaccuracy introduced by Lidar-generated gross sections and its impact on 1D hydrodynamic simulations.** Environmental Earth Sciences, 2015, vol. 73, issue 1, 1-11.
- PODRÁZSKÝ V. et REMEŠ J., 2006: **Retenční schopnost lesních ekosystémů.** Lesnická práce. Dostupné z <http://lesprace.silvarium.cz>, svazek 85, č. 7, s. 232, ISSN: 0322-9254.
- RAMSANKARAN R., MAERKER CH. et MALCHEREK A., 2010: **Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport processes during storm events in a non-perennial river.** Journal of Hydrology and Hydromechanics, 58, 1, 36–48, ISSN 0042-790X.
- ROUB R., 2004: **Comparison of models DesQ-MaxQ and HEC-HMS.** In, 22. 9. 2004, Sustain Life Secure Survival II, Socially and Environmetally Responsible Agribusiness, Czech University of Agriculture in Prague, Praha, ISBN 80-213-1197-5.
- ROUB R., HEJDUK T. et NOVÁK P., 2012: **Využití dat z tvorby nového výškopisu území České republiky metodou leteckého laserového skenování při analýze a mapování povodňových rizik.** Geodetický a kartografický obzor, ročník 58/100, 4-8.
- SINGH V. P., 1995: **Computer Models of Watershed Hydrology.** Water Resources Publications, Colorado, USA, 1130 pp, ISBN 0-918334-91-8.
- SKALOŠ J., WEBER M., LIPSKÝ Z., ŘEPÁKOVÁ I., ŠANTRŮČKOVÁ M., UHLÍŘOVÁ L. et KUKLA P., 2011: **Using old military survey maps and orthophotograph maps to analyse long-term land cover changes: case study (Czech Republic).** Applied Geography, No. 31, p. 426–438.
- **Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik (povodňová směrnice).**

- **Strategie ochrany před povodněmi pro území ČR (2002).** Usnesení vlády ČR č. 38/2000, Praha. (on-line: http://www.mze.cz/attachments/o_pp35.pdf, 20. 8. 2007).
- **Studie proveditelnosti. Přeštice, inundační průlehové koryto v lukách u Příchovic a úpravy koryta Úhlavy ve městě Přeštice.** Město Přeštice. 2008
- UHLÍŘOVÁ K. et ZBOŘIL A., 2009: **Možnosti využití Laserového snímání povrchu pro vodohospodářské účely.** Vodní hospodářství, ročník 59, č. 12, s. 11 - 15.
- TRIMBLE S. W., 2003: Historical hydrographic and hydrologic changes in the San Diego creek watershed, Newport Bay, California. *Journal of Historical Geography*, Vol. 29, No. 3, p. 422–444.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center: **HEC-RAS Hydraulics Reference Manual.** USA.
(on-line: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>)
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center: **HEC-RAS User's Manual.** USA.
(on-line: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>)
- VALENTA P., 2005: **Využití numerických modelů proudění vody v protipovodňové ochraně.** ČVUT, Praha, 26s., ISBN 80-01-03202-7.
- VALENTOVÁ J., VALENTA P. et WEYSKRABOVÁ L., 2010: **Assessing the retention capacity of a floodplain using a 2D numerical model.** *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58, 4, 221–232, ISSN 0042-790X.
- VOPÁLKA J., 2003: **Přístup ministerstva životního prostředí k problematice povodní.** In Celostátní seminář Lesy a povodně. Praha, ČLS, MŽP, MZe, 25.6.2003, s. 8-11. ISBN 80-02-01564-9.
- WEHR A., et LOHR U., 1999: **Airborne laser scanning – an introduction and overview.** *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82.
- WEYSKRABOVÁ L., VALENTOVÁ J., VALENTA P., MYSLIVEC D., FOŠUMPAUR P. et ŠEPELÁK J., 2010: **Hydraulické a hydrologické přístupy ke stanovení retenční**

kapacity říční nivy. In: Voda a krajina. Praha: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2010, s. 134-141. ISBN 978-80-01-04614-2.

- WMO Publ., 1994: **Guide to Hydrological Practices.** No 168. Geneva, 735 p., ISBN 978-92-631-5168-1.

PŘÍLOHA 1

POROVNÁNÍ HYDRODYNAMICKÉHO MODELU Z DAT DMR 5. GENERACE A MODELU Z DAT UPRAVENÝCH POMOCÍ NÁSTROJE CROSOLVER

Radek Roub¹⁾, Marie Kurková¹⁾, Tomáš Hejduk^{1, 2)}, Luděk Bureš¹⁾, Pavel Novák²⁾

Česká zemědělská univerzita v Praze – Fakulta životního prostředí
Katedra vodní hospodářství a environmentálního modelování
Kamýcká 1176, 165 21 Praha ž – Suchdol

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
Žabovřeská 250, Praha 5 Zbraslav

Klíčová slova

letecké laserové skenování (LLS) – hydrodynamický model – HEC-RAS – CroSolver - příčný profil - povodně

Souhrn

Povodeň je přírodní jev, který se vyskytuje v různé intenzitě a nepravidelných časových intervalech. Povodně představují pro Českou republiku největší přímé nebezpečí v oblasti přírodních katastrof a mohou být i příčinou závažných krizových situací, při nichž vznikají nejenom rozsáhlé materiální škody, ale rovněž ztráty na životech obyvatel postižených území a dochází k rozsáhlé devastaci kulturní krajiny včetně ekologických škod. Z hlediska eliminace potenciálního ohrožení a samotných následků těchto událostí jsou významné informace předpovědní povodňové služby o charakteru a o rozsahu záplavových území pro jednotlivé N-leté povodňové průtoky a konkrétní povodňové scénáře. Adekvátní představu o hloubkách a rychlostech při povodňové události, v podélném či příčném profilu vodního toku, poskytují hydrodynamické modely. Získané informace z hydrodynamických modelů tak zaujímají výsadní postavení z pohledu ochrany životů i zmírnění škod na majetku občanů.

Základním vstupem do hydrodynamických modelů jsou výškopisná data. Jedním ze způsobů získání dat je jejich pořízení metodou leteckého laserového skenování (LLS) z digitálního modelu reliéfu (DMR). Tato metoda je označována za jednu z nejpřesnějších metod pro získání výškopisných dat. Jejím úskalím je však neschopnost zaznamenat geometrii terénu pod vodní hladinou, a to díky pohlcení laserového paprsku vodní masou. Absence geometrických dat o průtočné ploše vodního toku může citelně ovlivnit výsledky modelování, zejména pokud chybějící část koryta reprezentuje svou kapacitou významnou průtočnou plochu. Jedním ze způsobů odstranění této chyby je dodatečné zahloubení koryta pomocí softwarových nástrojů, jakým je například CroSolver.

Předkládaný příspěvek se zabývá sestavením hydrodynamického modelu s využitím dat DMR 5. generace a porovnává jeho výstupy při různých průtocích s modelem založeným na výškopisných datech upravených pomocí nástroje CroSolver. Jedná se o srovnání výstupů hydrodynamických modelů v programu HEC-RAS při použití zahloubených dat a při použití neupraveného DMR. Srovnání je provedeno na úsecích dvou vodních toků s odlišnou morfologií terénu a velikostí toku. Doplňujícím výstupem je porovnání záplavových území vycházejících z obou variant modelů.

Z výsledků vyplývá, že rozdíly ve výstupech jsou významné především u nižších průtoků (Q_1 , Q_5), zatímco pro Q_{50} a Q_{100} je rozdíl zanedbatelný, přičemž velký vliv má samotná morfologie modelovaného území a velikost toku.

1. Úvod

Hydrodynamické modely jsou využívány pro simulaci hydraulických jevů a vycházejí z fyzikálního popisu proudění, zejména zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie. Z hlediska podrobnosti řešení a nároků na vstupní data se rozdělují na jednorozměrné (1D) a dvourozměrné (2D), případně kombinované (1D/2D) (Roub et al., 2015).

Hlavním faktorem pro tvorbu hydrodynamických modelů jsou vstupní data pro vytvoření výpočetní geometrie vodního toku (Ernst et al., 2010). Požadavky na vstupní data se liší s ohledem na použitý hydrodynamický model. Jednorozměrné (1D) hydrodynamické modely se vyznačují nižšími požadavky na vstupní data, kdy výpočetní trať je tvořena příčnými profily koryta, naproti tomu u dvourozměrných (2D) hydrodynamických modelů je nutné sestavit pro celé řešené území digitální model reliéfu. Alternativou k uváděným modelům jsou kvazi-2D modelovací přístupy, které jsou kombinací výpočetních přístupů 1D či 2D (Lindenschmidt, 2008). Skutečná komplikovaná prostorová geometrie se zde uměle rozdělí na části a schematizuje se větvenou či okruhovou sítí složenou z několika dílčích modelů, např. koryto a inundace (Valentová et al., 2010; Valenta, 2005).

V případě jednorozměrného modelování se k získání dat výpočetní geometrie vodního toku a přilehlé inundace využívá geodetické zaměření, fotogrammetrie, LLS nebo kombinace těchto metod (Novák et al., 2011).

Geodetické zaměření koryta a přilehlé inundace vodních toků bývá časově i finančně nejnáročnějším způsobem pro zajištění informací o geometrii vodních toků s ohledem na velikost zaměřeného bodového pole (Bharat and Mason, 2001). V rámci získání dat pro hydrodynamické modely jsou polohopisně zaměřeny osy vodního toku, dále polohopisně i výškopisně příčné profily a objekty na vodním toku. Vzdálenost mezi jednotlivými zaměřenými příčnými profily se pohybuje v řádech desítek až stovek metrů, závisí zejména na variabilitě tvaru říčního koryta. Zaměřením musí být zaznamenána prostorová proměnlivost toku, jedná se zejména o změny příčného průřezu koryta a změny podélného sklonu. Obvyklá vzdálenost příčných profilů na tocích v České republice se pohybuje mezi 50 až 100 metry v intravilánu, 200 až 400 metry v extravilánu (Drbal et al., 2012).

Geodetické zaměření je také nezbytnou součástí letecké fotogrammetrie, kde je využíváno pro zaměření geodetických souřadnic a výšky vličovacích bodů. Vličovací body slouží pro určení orientace, transformaci do geodetického systému a pro určení měřítka. Jedná se tedy o postup, jak pořízené snímky ztotožnit s reálným terénem. (Pavelka, 2009)

Fotogrammetrie je vědní obor spadající pod geodezii a kartografii, který se zabývá získáváním geometrických dat z obrazového záznamu, tedy fotografického snímku. Letecká fotogrammetrie využívá dvou vhodně pořízených snímků (stereofotogrammetrie), které zobrazují stejné území s určitým překryvem. Sběr dat je dále limitován kvůli použití pasivního snímače, který je ovlivňován atmosférickými procesy. Letecká fotogrammetrie se používá pro sběr polohopisných a výškopisných dat ve velkých a středních měřítkách s dostatečnou přesností a s výrazně nižšími náklady a nízkou časovou náročností, než při použití geodetických metod. Nízká časová náročnost umožňuje častější opakování a tím i udržování aktuálnosti dat (Metodický pokyn, 28181/2005-16000).

Třetí způsob sběru prostorových dat pro tvorbu výpočetní geometrie vodních toků do hydrodynamických modelů představuje letecké laserové skenování. Metoda LLS patří mezi nejmodernější technologie získávání polohopisných a výškopisných dat. Letecké laserové skenování je vyvinuto pro rychlé a operativní mapování rozsáhlých území, kde standardní metody (tachymetrie, GPS, fotogrammetrie) již nestačí (Dolanský, 2004).

Metoda LLS je založena na principu odrazu laserových paprsků, přičemž je nutné znát přesnou polohu skeneru a zároveň přesný směr vyslání paprsku. Princip spočívá v zaznamenání doby mezi vysláním svazku laserových paprsků (zpravidla v oblasti infračerveného spektra) a přijetím jeho odrazu. Zpracováním parametru se vypočítá poloha daného bodu (Wehr et Lohr, 1999; Dolanský, 2004; Novák et al., 2011; Oršulák et Pacina, 2012). Výhodou metody je rychlost sběru dat, relativně nízké náklady, schopnost zaměření složitého terénu a rozsáhlých území (Charlton et al., 2003).

V současné době probíhá v České republice (ČR) nové výškopisné mapování metodou LLS, která navazuje na současné výškopisné databáze, jež jsou v určitých územních typech již zastaralé a přesností a kvalitou negativně ovlivňují kvalitu státních mapových děl i digitálních geografických databází ČR (Brázdil, 2009). Cílem je ve spolupráci s Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK), Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem obrany zajistit kvalitní geografickou datovou infrastrukturu, jednotnou a standardizovanou pro celé území ČR.

2. Metodika

2.1 Podkladová data

Základním podkladem byla výškopisná data DMR České republiky 5. generace. Tato data byla poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK) a byla dodána v souřadnicovém referenčním systému S-JTSK a výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) v ASCII kódování a formátu hodnot X, Y, H.

Data o N-letých průtocích byla převzata z Evidenčního listu hlášeného profilu č. 127 pro Otavu a č. 182 pro Úhlavu (Tab. 1)

Lokalita	N – leté průtoky Q_n [m ³ /s]				
	Q ₁	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Otava	146	300	394	680	837
Úhlava	36,7	82,4	111	201	250

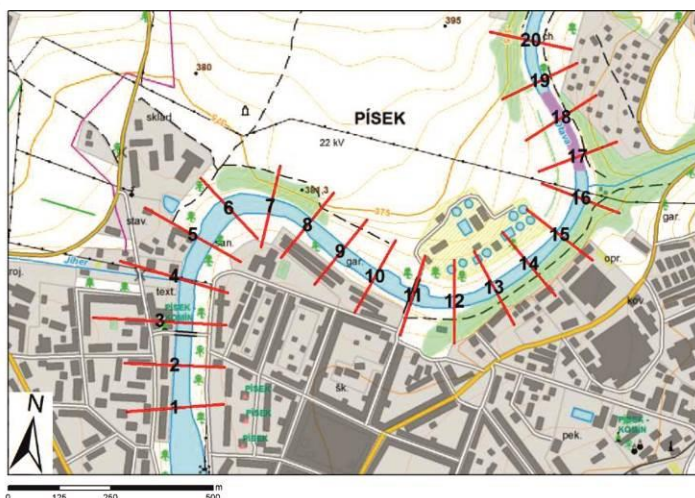
Tab. 1. Hodnoty průtočných objemů odpovídající N-letým průtokům

2.2 Charakteristika zájmových území

Hydrodynamické modely byly řešeny na úsecích dvou vodních toků s odlišnou morfologií terénu a velikostí toku. První zájmovou lokalitou je úsek vodního toku Otava v Písku, druhou je úsek toku Úhlava v Přešticích.

2.2.1 Lokalita Otava

Lokalitu Otava představuje 2 224 m dlouhý úsek toku na území obce Písek. Řešený úsek je vymezen ř.km 22,4 - 24,6, který byl rozdělen celkem do 20 příčných profilů (Obr. 1). Vybraný úsek se nachází v centrální a severovýchodní části města.

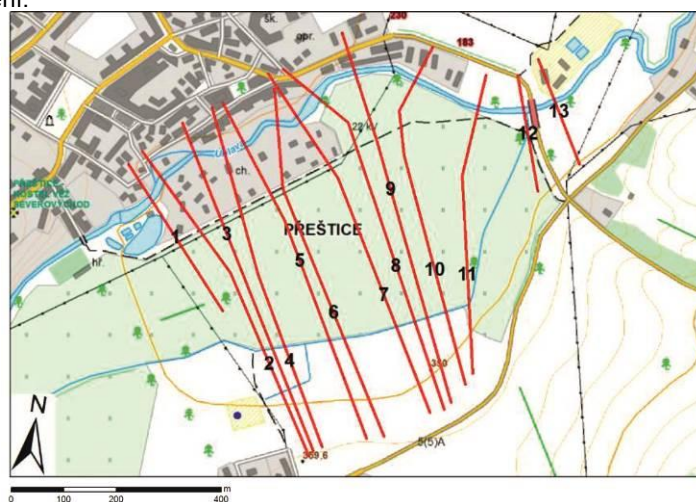


Obr. 1. Umístění příčných profilů na úseku vodního toku Otava

Otava je vodní tok III. řádu a je levostranným přítokem Vltavy, vznikající soutokem Vydry a Křemelné na Šumavě u Čeňkovy Pily. Vodní tok Otava se ve vybraném úseku vyznačuje již typickým nížinným charakterem s průměrnou šířkou hladiny cca 35 m. Průměrný roční průtok v tomto úseku je 23,4 m³/s a průměrný roční stav je 90 cm (ČHMÚ, 2015a).

2.2.2 Lokalita Úhlava

Druhou zpracovanou lokalitou je 1 280 m dlouhý úsek vodního toku Úhlava na území obce Přeštice. Vybraný úsek je vymezen ř.km 30,5 – 31,7, který byl rozdělen celkem do 13 příčných profilů (Obr. 2). Jedná se o menší vodní tok než Otava s průměrným ročním průtokem 5,51 m³.s⁻¹ (ČHMÚ, 2015b). Specifická je zde morfologie terénu, kde celá pravobřežní strana je vůči toku velmi nízko položená a lze zde předpokládat rozsáhlý rozliv v případě vyběžení.



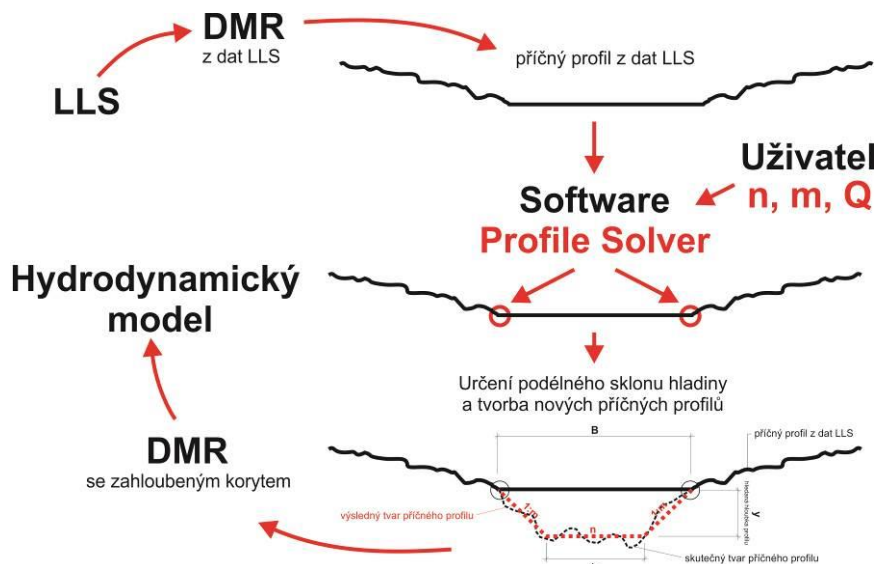
Obr. 2. Umístění příčných profilů na úseku vodního toku Úhlava

2.3 Nástroj CroSolver Toolbox

Vzhledem ke skutečnosti, že při LLS neproniká laserový paprsek vodní hladinou, dochází k zanedbání reálného tvaru koryta a tím může dojít k významnému zkreslení výsledků při hydrodynamickém modelování (Podhoranyi and Fedorcak, 2014). K řešení tohoto problému byl vyvinut nástroj CroSolver (Cross section Solver),

a to ve dvou variantách: CroSolver jako knihovna funkcí pro programovací jazyk R a dále CroSolver Toolbox, sestávající ze skriptu napsaných v jazyce Python, pro použití v programu ArcGIS (Roub et al., 2015).

Základní výpočetní diagram nástroje je znázorněn na Obr. 3. V rámci preprocessingu dojde nejprve k vytvoření příčných profilů na základě zadané vzdálenosti mezi profily a šířky vodního toku, přičemž vzdálenost profilů ovlivňuje podrobnost výsledku. Zhloubení pak probíhá na základě dalších parametrů koryta v době pořizování LLS, jimiž jsou průtok, drsnostní součinitel koryta, sklony svahů, vzdálenost vyhlazení hladiny a výběr metody zhloubení (Roub et al., 2015).



Obr. 3. Základní pracovní schéma nástroje CroSolver (CroSolver, 2014)

V dalším kroku se vytvořené příčné profily připraví pro výpočet zhloubení. Vytvořené příčné profily jsou pouze dvourozměrné. Krajní body příčných profilů mají charakterizovat styk hladiny a břehu koryta. Jelikož hledáme bod, který je co nejbližší hladině, tak pro něj platí, že má nejnižší výšku. Proto se do nástroje zadává poloměr hledání takového bodu. Nástroj v oblasti hledání nalezne nejnižší bod a vrátí jeho výšku a polohu na kolmici k příčnému profilu. Takto definovaný bod charakterizuje bod na svahu břehu u hladiny.

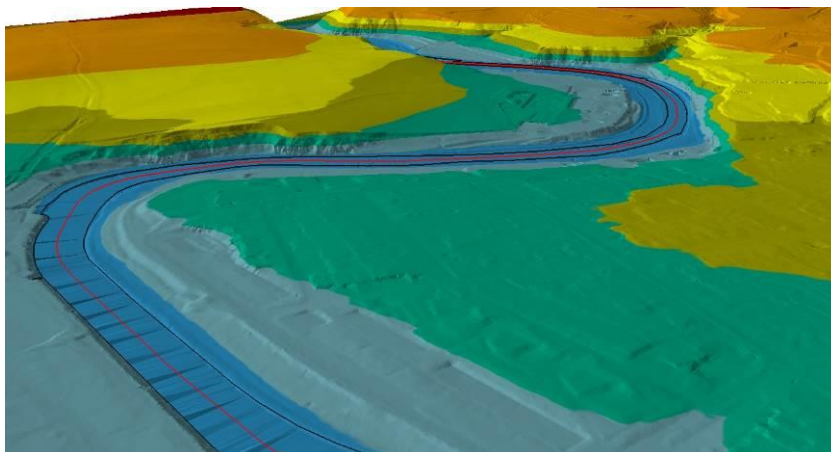
Výpočet zhloubení koryta vodního toku je založen na připravených datech z preprocessingu a charakteristikách koryta vodního toku. Výpočet je proveden pro ustálené rovnoměrné proudění s využitím rovnice kontinuity a Chézyho rovnice s výpočtem rychlostního součinitele dle Manninga:

$$\begin{aligned}
 Q &= v \cdot S \\
 v &= C \cdot \sqrt{R \cdot i} \\
 R &= \frac{S}{Q} \\
 C &= \frac{1}{n} R^{1/6}
 \end{aligned}$$

kde: Q - průtok, ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), S - průtočná plocha, (m^2), v - rychlost proudění, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), C - rychlostní součinitel, ($\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$), i - sklon hladiny, (-), R - hydraulický poloměr, (m), n - Manningův drsnostní součinitel, (-) (Roub et al., 2015).

2.4 Tvorba digitálního modelu reliéfu v programu ArcGIS

Data DMR 5G byla dodána v ASCII kódování ve formátu *.xyz, proto bylo nezbytné je nejprve převést na shapefile (konkrétně bodovou vrstvu) v programu ArcGIS pomocí funkce *ASCII 3D to feature class* z extenze 3D Analyst. Následně byl z bodové vrstvy vytvořen digitální model terénu ve formátu TIN. Ukázka výsledného modelu TIN na území Písku je zobrazena na Obr. 4.



Obr. 4. 3D zobrazení digitálního modelu terénu lokality Písek

2.5 Tvorba geometrie v extenzi HEC-GeoRAS

Jedním ze základních vstupů do programu HEC-RAS je výpočetní geometrie vodního toku. Ta je tvořena především osou toku, břehovými liniemi a příčnými profily s výškopisnými daty. Všechny podklady byly vytvořeny v programu ArcGIS pomocí extenze HEC-GeoRAS, která umožňuje přímý export dat v podobě použitelné pro HEC-RAS.

V případě Otavy byla využita možnost automatického rozmístění profilů s drobnými manuálními úpravami tak, aby se profily nekřížily a co nejlépe vystihly geometrii vodního toku. Pro Úhlavu bylo nutné vytvořit asymetrické profily vzhledem k velké inundační ploše na pravém břehu toku. Tyto profily byly vykresleny manuálně se zalomením, aby nedocházelo k jejich křížení.

Pomocí funkce *RAS Geometry - XS Cut Line Att.* – All byla vytvořena 3D vrstva příčných profilů. Tím došlo k vyplnění atributové tabulky příčných profilů (zejména doplnění staničení) a vytvoření vrstvy příčných profilů s informacemi o výškopisu převzatými z digitálního modelu terénu.

2.6 Zahloubení koryta pomocí nástroje CroSolver Toolbox

Vstupní vrstvou do nástroje CroSolver je osa toku vektorizovaná proti směru proudění. Dalším vstupem je DMR v textovém formátu *.txt. Data od ČÚZK byla dodána ve formátu *.xyz, bylo tedy nutné je nejprve uložit do požadovaného formátu. Samotné zahloubení probíhá ve třech krocích.

V prvním kroku bylo potřeba zvolit soubor vstupní osy vodního toku a dále parametry pro rozdělení vodního toku na jednotlivé polygony, tj. vzdálenost příčných profilů po ose a průměrná šířka vodního toku. Pro Otavu byla zvolena vzdálenost profilů 80 m a šířka toku 30 m, pro Úhlavu byla nastavena vzdálenost 60 m a šířka vodního toku 15 m.

Ve druhém kroku se jako vstup zadává výstupní soubor z předchozího kroku (bud' jako textový soubor, nebo jako shapefile) a DMR ve formátu *.txt. Poloměr hledání nejnižšího bodu byl v obou případech nastaven na 10 m.

Ve třetím kroku se opět jako vstup zadává výstup z předchozího kroku a volitelnými parametry jsou: metoda výpočtu zahloubení, průtok, drsnostní součinitel dle Manninga, sklon svahu a minimální vzdálenost pro výpočet hladiny (Tab. 2). Hodnota průtoku byla zadána skutečná v době získávání dat pomocí LLS.

Parametr	Otava	Úhlava
metoda výpočtu	dle sklonu	dle sklonu
průtok [m ³ .s ⁻¹]	15,2	3,612
drsnostní součinitel [-]	0,033	0,026
sklon svahu 1:m [-]	2	2
min. vzdálenost pro výpočet hladiny [m]	100	100

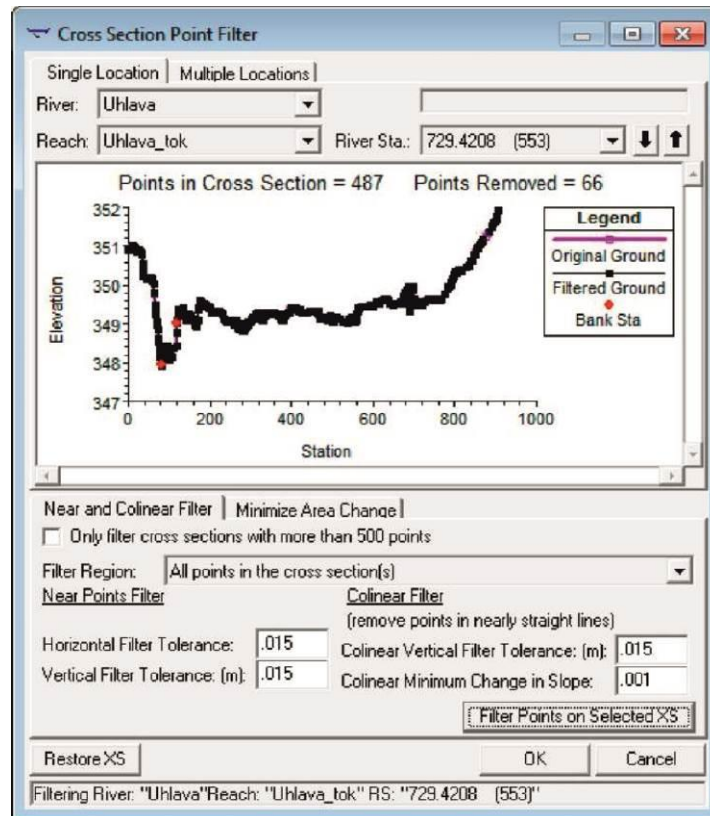
Tab. 2. Zvolené parametry při zahloubení koryta

2.7 Sestavení hydrodynamického modelu v programu HEC-RAS

V programu HEC-RAS 4.1.0 byly sestaveny pro obě lokality dva modely, které se lišily pouze vstupními geometrickými daty. Zadávané průtoky, drsnosti a okrajové podmínky byly zachovány stejné. Pro Otavu byly zvoleny následující hodnoty: koryto - 0,033, levý břeh u prvních tří profilů, kde se nachází hladká betonová stěna - 0,026, zbývající břehy, kde se nachází zejména travní porost - 0,03. Pro Úhlavu byly zvoleny tyto drsnosti: koryto - 0,026, břehy s travním porostem - 0,027.

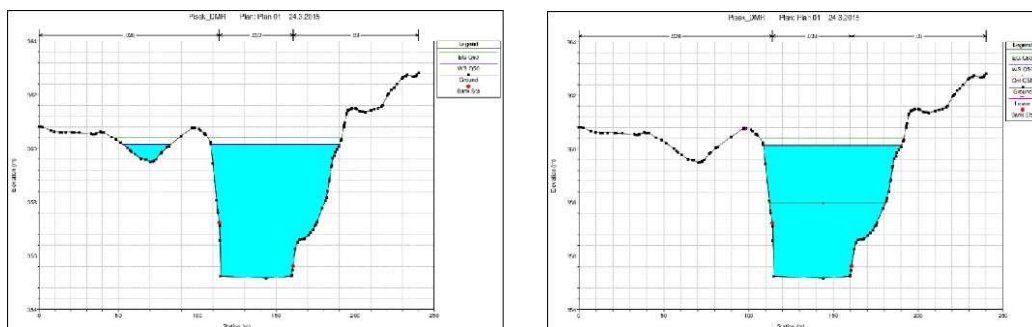
Horní okrajové podmínky byly dány N-letými průtoky – Q_1 , Q_5 , Q_{10} , Q_{50} a Q_{100} . Jako dolní okrajová podmínka byla zvolena Critical Depth, kdy program vypočítá kritickou hloubku pro každý profil a není nutné zadávat další údaje. Samotná simulace modelů byla provedena v podkritickém režimu proudění.

V případě Úhlavy bylo nutné dodatečně upravit geometrická data. Vzhledem k velké podrobnosti dat DMR 5G a šířce příčných profilů přesahoval počet bodů v některých profilech maximální hodnotu (500). U těchto profilů bylo nutné provést automatické odfiltrování nadbytečných bodů v prostředí editace geometrických dat (Obr. 5).



Obr. 5. Odfiltrování bodů v příčných profilech

Další úpravy byly nezbytné na Otavě, kde bylo nutné doplnit kritérium „levees“ (Obr. 6). Program HEC-RAS modeluje zatopení v příčném řezu podle nadmořských výšek, neuvažuje však terénní překážky, které by voda musela nejprve překonat. Do příčných řezů bylo vloženo staničení a nadmořská výška potřebných bodů.



(a) Výsledek bez použití „levees“

(b) Výsledek s použitím „levees“

Obr. 6. Porovnání modelu s kritériem levees a bez kritéria levees

Na Úhlavě toto opatření nebylo použito vzhledem k morfologii terénů. Na základě prozkoumání DMR a leteckého snímku oblasti bylo uvažováno rozliti po celé ploše, jelikož terénní nerovnosti jsou malé a nepravidelné.

3. Výsledky

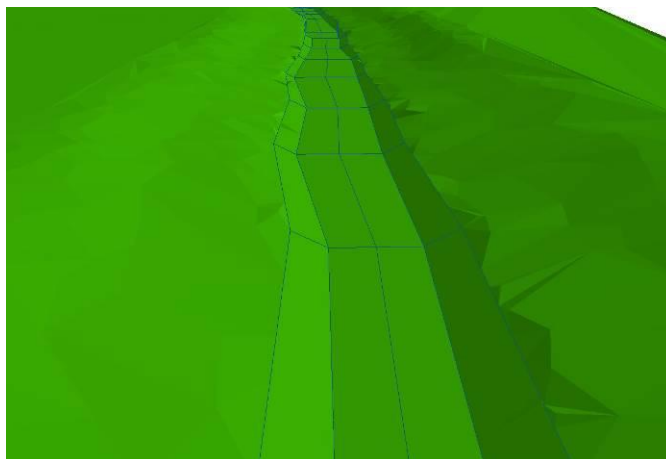
Výsledky jsou prezentovány grafickým porovnáním tří výstupních charakteristik z modelů HEC-RAS:

- a) nadmořské výšky hladiny,
- b) průtočné plochy,
- c) šířky v hladině.

Pro srovnání byl zobrazen jednak průběh hodnot v celém podélném profilu, jednak průměrné hodnoty rozdílů charakteristik ve všech příčných profilech pro jednotlivé N-leté průtoky. Průměrné odchylky byly vypočítány odečtením hodnoty zahloubeného od nezahloubeného. Dále byla porovnána záplavová území vycházející z jednotlivých modelů. V uvedených souhrnných grafech jsou vykresleny výsledky pro nezahloubené koryto (označení DMR 5G) a zahloubené (označení CroSolver).

3.1 Vyhodnocení lokality Otava

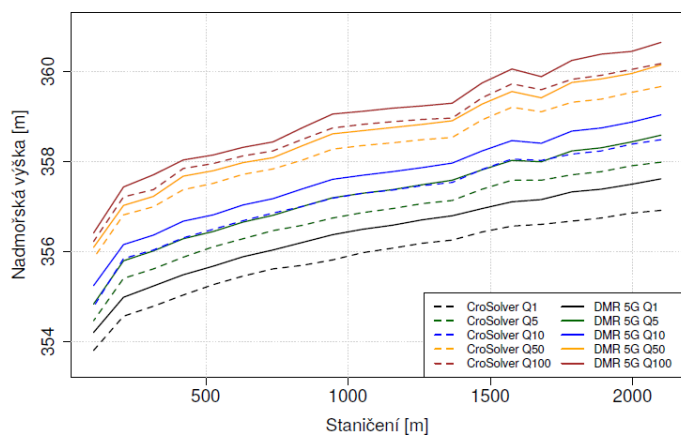
Na Obr. 7 je ukázka koryta vodního toku zahloubeného nástrojem CroSolver v porovnání s neupraveným profilem z dat DMR 5G. Je patrné, že jediný rozdíl v geometrii se objevuje pouze v korytě, inundace a okolí se tímto procesem nemění.



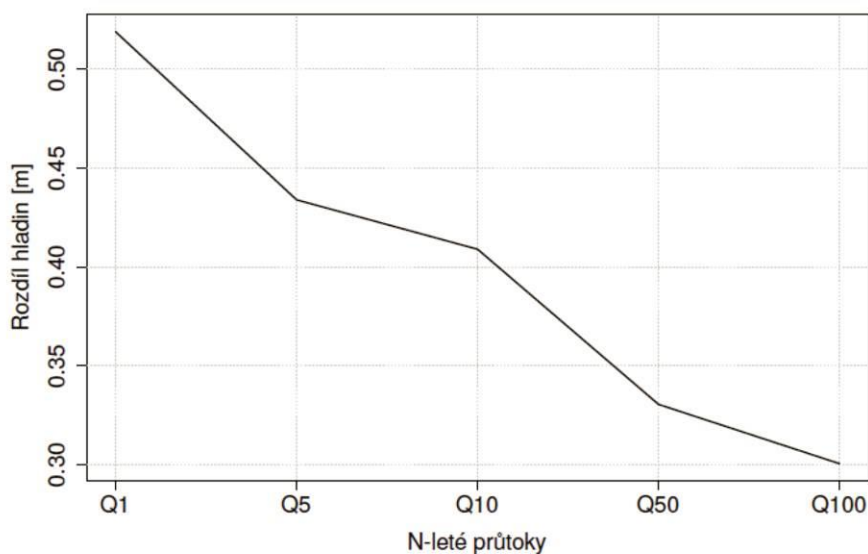
Obr. 7 Ukázka zahloubeného profilu ve srovnání s nezahloubeným

3.1.1 Porovnání nadmořských výšek hladin

Z Obr. 8 a 9 je zřejmé, že se rozdíl mezi nadmořskými výškami hladiny pro zahloubené a nezahloubené koryto vodního toku plynule snižuje. Pro některé průtoky dokonce dochází k jevu, kdy výsledek DMR 5G odpovídá jiné N-letosti výsledku CroSolveru (například model založený na DMR 5G pro Q_5 podává téměř stejné výsledky jako model se zahloubením pro Q_{10}).



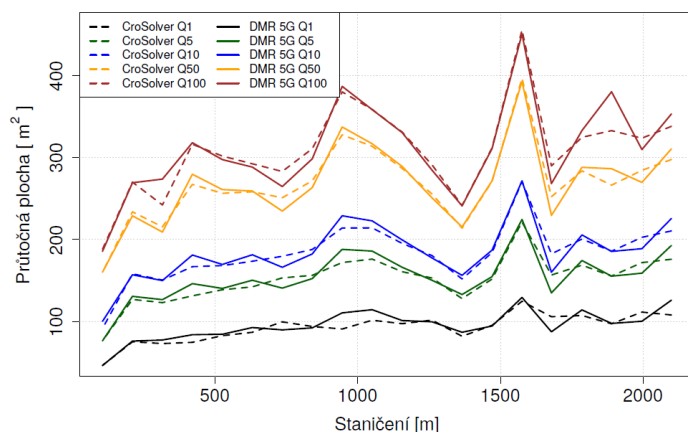
Obr. 8 Porovnání nadmožských výšek hladin v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



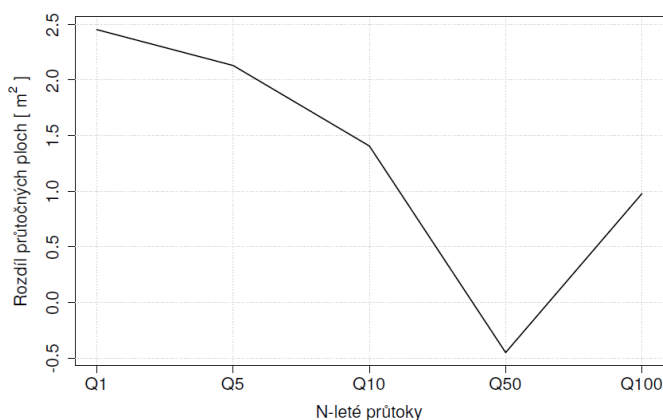
Obr. 9 Průměrná odchylka nadmožských výšek při jednotlivých průtocích

3.1.2 Porovnání průtočných ploch

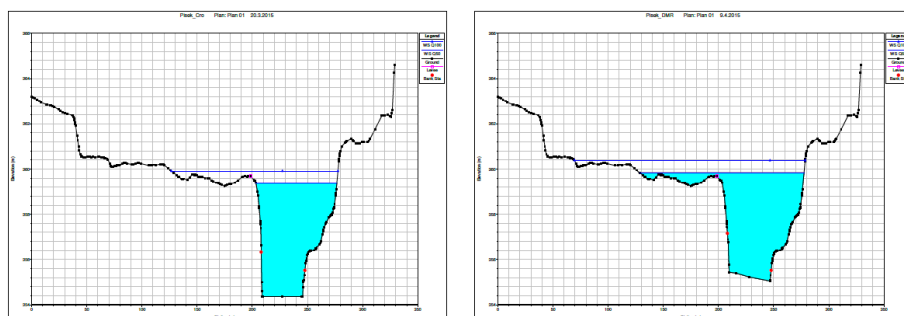
U průtočných ploch je trend méně jednoznačný (Obr 11). Rozdíl průtočných ploch se nejprve postupně snižuje, celkově však není významný a u Q_{50} je plocha ze zahloubeného modelu dokonce větší než plocha z modelu nezahloubeného. Zlom u Q_{100} lze vysvětlit na základě Obr. 10, kde je u výsledků modelu na podkladě DMR 5G patrný náhlý nárůst průtočné plochy ve dvou příčných profilech. Tyto odchylky byly způsobeny vybřežením vodního toku v daných místech při nezahloubeném modelu a následným rozlivem, který významně změnil tvar průtočné plochy. Ukázka rozdílu rozlivu v příslušném profilu je zobrazena na Obr. 12.



Obr. 10 Porovnání průtočných ploch v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



Obr. 11 Průměrná odchylka průtočných ploch při jednotlivých průtocích



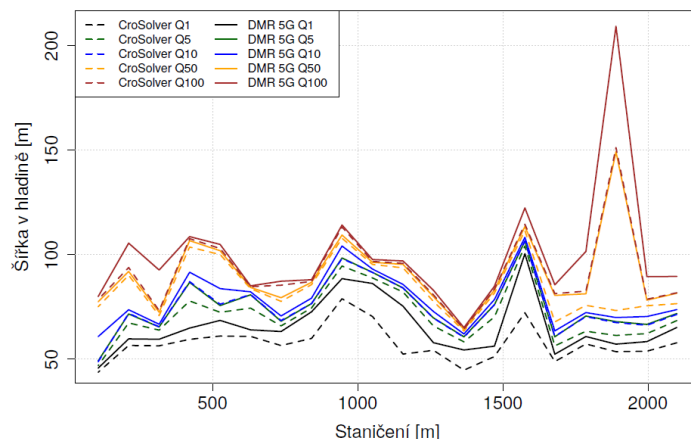
(a) CroSolver

(b) DMR 5G

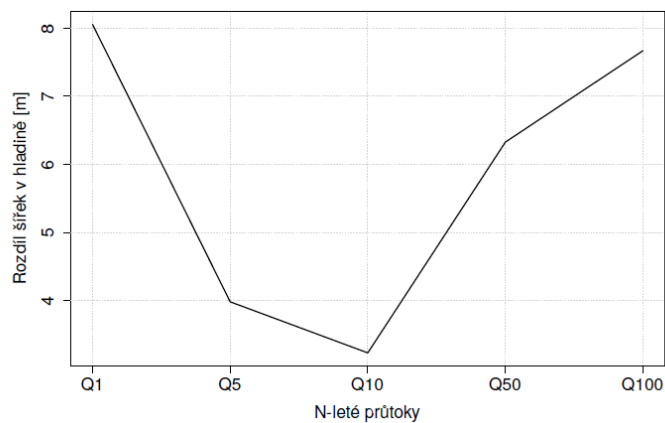
Obr. 12 Srovnání rozlivu v profilu č. 3 - Q₅₀ a Q₁₀₀

3.1.3 Porovnání šířek v hladině

Šířka v hladině je významně závislá na morfologii terénu. Vlivem rozdílného rozlivu dochází ke zkreslení průměrných rozdílů (Obr. 14). Situace je obdobná jako v případě průtočných ploch. Výsledek je lépe pozorovatelný z Obr. 13. Je zde patrné, že rozdíl šířek v hladině je výrazný především u nižších průtoků (Q₁, Q₅ a Q₁₀₀), zatímco pro Q₅₀ a Q₁₀₀ je průběh na většině úseku prakticky shodný. Výjimku tvoří několik příčných profilů, kde došlo k většímu rozlivu do inundace pro model založený na DMR 5G a tím i ke skokovému nárůstu rozdílů šířky v hladině (Obr. 12).



Obr. 13 Porovnání šířek v hladině v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



Obr. 14 Průměrná odchylka šířek v hladině při jednotlivých průtocích

3.1.4 Porovnání záplavových území

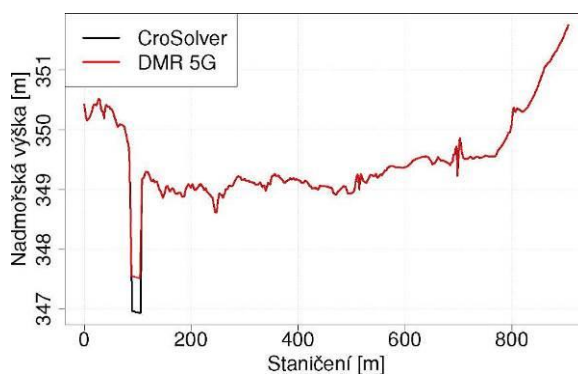
Pro znázornění rozdílu rozlivu bylo vybráno záplavové území Q₁. Na Obr. 15 je patrné, že i pro nejmenší průtok, pro který všechny pozorované charakteristiky vykazovaly největší rozdíly mezi zahloubeným a nezahloubeným modelem, je rozdíl záplavového území minimální.



Obr. 15 Porovnání záplavového území při průtoku Q₁ na lokalitě Otava

3.2 Vyhodnocení lokality Úhlava

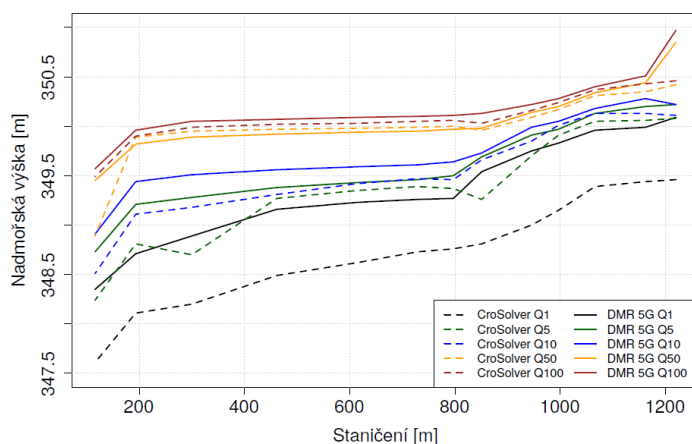
Na Obr. 16 je ukázka příčného profilu na řešeném úseku Úhlavy. Jedná se o charakteristický příklad morfologie terénu zájmové lokality. Na pravém břehu se nachází rozsáhlé inundační území.



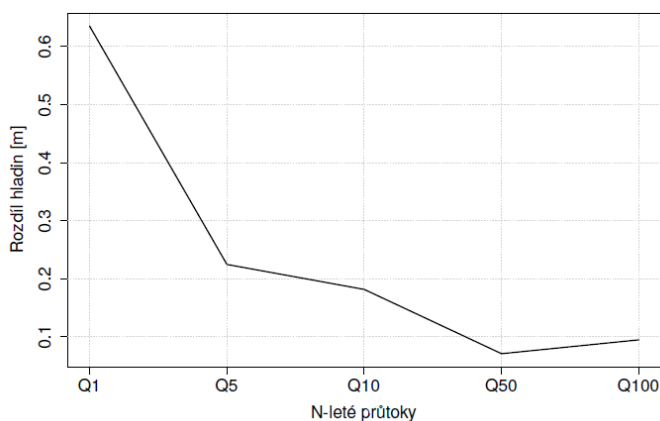
Obr. 16 Porovnání geometrie profilu č. 9

3.2.1 Porovnání nadmořských výšek hladin

Z Obr. 17 a 18 vyplývá, že významný rozdíl nadmořských výšek hladin se objevil především při Q_1 . U tohoto průtoku došlo k vybřežení pouze u nezahluobeného modelu, koryto upravené nástrojem CroSolver bylo pro převedení tohoto průtoku ještě dostatečně kapacitní. Pro Q_{50} a Q_{100} je rozdíl nadmořských výšek hladiny již zanedbatelný.



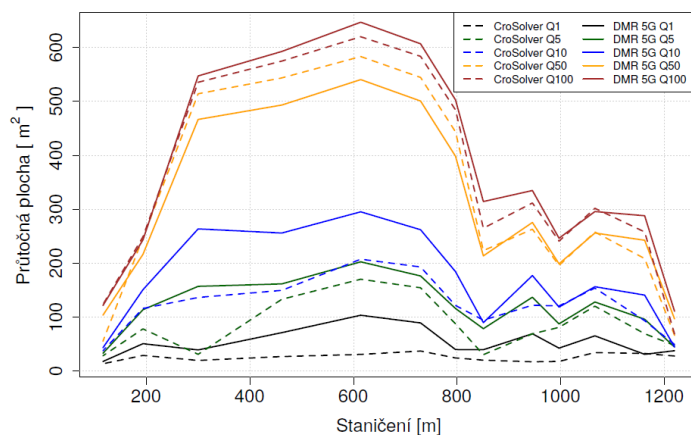
Obr. 17 Porovnání nadmořských výšek hladin v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



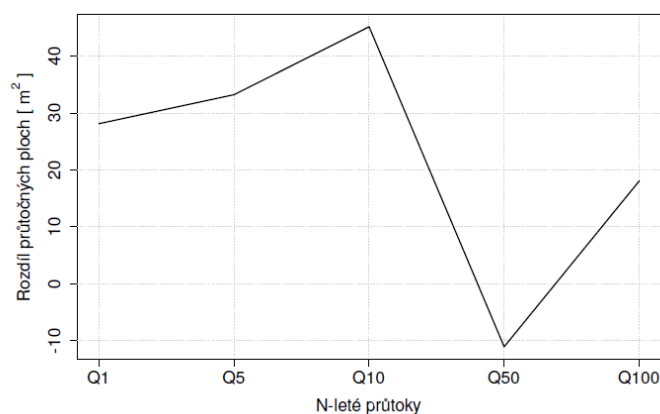
Obr. 18 Průměrná odchylka nadmořských výšek při jednotlivých průtocích

3.2.2 Porovnání průtočných ploch

Vzhledem ke složitému terénu a rozsáhlému rozlivu zde byla velikost průtočné plochy značně proměnlivá. Na Obr. 19 a 20 jsou patrné nejednoznačné výsledky pro tuto charakteristiku.



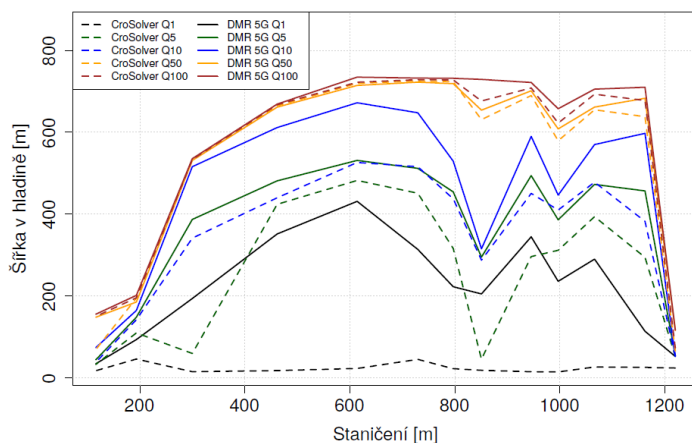
Obr. 19 Porovnání průtočných ploch v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



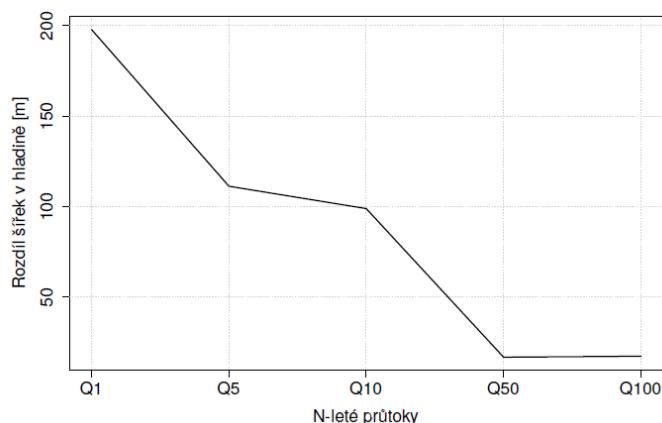
Obr. 20 Průměrná odchylka průtočných ploch při jednotlivých průtocích

3.2.3 Porovnání šířek v hladině

Do výsledných šířek v hladině se opět promítá způsob rozlití vody do inundace. Na Obr. 21 a 22 je vidět, že se rozdíly šířek v hladině postupně zmenšují až po Q₅₀ a Q₁₀₀, kdy jsou průběhy šířek v hladině prakticky totožné pro obě varianty modelu.



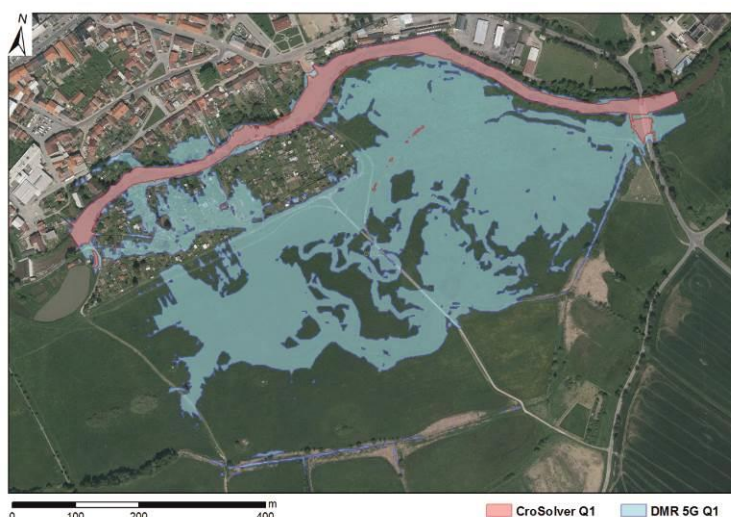
Obr. 21 Porovnání šířek v hladině v podélném profilu pro jednotlivé průtoky



Obr. 22 Průměrná odchylka šířek v hladině při jednotlivých průtocích

3.2.4 Porovnání záplavových území

Pro ilustraci byla vybrána simulace Q_1 . Na Obr. 23 je vidět rozdíl rozlivů způsobený dostatečnou retenční schopností koryta v modelu se zahloubeným oproti nedostatečné kapacitě koryta v neupraveném modelu. U ostatních variant nebyl tento rozdíl tak výrazný vzhledem k tomu, že došlo k vybřežení i v zahloubeném modelu.



Obr. 23 Porovnání záplavového území při průtoku Q_1 na lokalitě Úhlava

4. Diskuse

Tento příspěvek se zabývá syntézou dat z hydrologického měření a LLS, které se nabízejí jako alternativa k využití dat z geodetického měření pro potřeby hydrodynamického modelování. Jedním z výstupů je posouzení možnosti využití dat LLS pro vodohospodářské účely, zatímco vývoj specializovaných nástrojů, jakým je CroSolver, se snaží eliminovat chyby vstupních dat do hydrodynamického modelování vycházející z LLS.

Při použití neupraveného DMR z dat získaných pomocí LLS je hlavním zdrojem chyby zanedbání zatopené části koryta vodního toku, čímž je ovlivněna velikost průtočné plochy a zejména omočeného obvodu.

Je však nutné zdůraznit, že i při využití samotného geodetického zaměření mohou vyvstat některé problémy, jakými jsou například nedostatečně kapacitní příčné profily či příliš velká vzdálenost mezi nimi. V případě využití příčných profilů z DMR lze tyto nedostatky snadno odstranit, použití geodeticky zaměřených dat však vyžaduje například dodatečně protažení příčného profilu nebo interpolaci příčných profilů na toku přímo v modelovacím softwaru (HEC, 2010). Tyto postupy mohou zanechat do výpočtu chyby.

Chyby se mohou zavést i použitím nástroje CroSolver. Na základě citlivostní analýzy Roub et al. (2015) potvrzují, že je CroSolver z hlediska vstupních parametrů (sklon svahů, drsnostní součinitel) dostatečně robustní. Mezi nedostatky však patří nemožnost volby tvaru schematizace příčného průřezu koryta vodního toku.

V současné době nástroj využívá schematizaci na lichoběžník, nicméně tento tvar nedokáže vystihnout přirozená koryta. Podhoranyi and Fedorcak (2014) k tomuto uvádějí, že doposud nebyl jednoznačně prokázán vliv tvaru použitého ke schematizaci na výsledky modelování. Komplikace mohou přinést také objekty na toku, se kterými v současné době CroSolver nedokáže uspokojivě pracovat. Na druhou stranu Roub et al. (2015) předpokládají zlepšování přesnosti nástroje společně se zpřesňováním vstupních dat DMR.

Mezi další zdroje chyb patří nepřesné změření průtoku použitého pro softwarové zahlubování. Dále je samotný DMR založený na LLS datově velmi objemný. Pro zpracování rozsáhlého území se tento faktor může projevit jako limitující. V tomto ohledu by bylo možné vhodně redukovat použití TIN, aniž by došlo ke snížení jeho přesnosti (Roub et al., 2012).

5. Závěr

Uvedený příspěvek si kladl za cíl porovnat výstupy hydrodynamického modelu založené na dvou variantách výpočetní geometrie: (1) příčné profily získané z DMR založené na datech DMR 5G, (2) příčné profily získané z DMR se zpracovaným korytem vodního toku zahloubeným pomocí nástroje CroSolver.

Z uvedených výsledků vyplývá, že výstupy hydrodynamického modelu založeného na DMR 5G jsou dle očekávání nadhodnocené oproti výsledkům zahloubeného modelu. Tyto rozdíly jsou nejvíce patrné pro nižší průtoky (Q_1 a Q_5), a to na obou řešených úsecích. Naopak pro Q_{50} a Q_{100} jsou rozdíly zanedbatelné. Tyto výsledky jsou odpovídající vzhledem k tomu, že byl předpokládán menší vliv průtoku dosaženého během LLS (využitý pro zahlubování) při vyšších modelovaných průtocích.

Rozdíly byly patrné v rámci srovnání mezi oběma lokalitami. Zatímco na Otavě byly rozdíly všech charakteristik vzhledem k velikosti toku relativně nevýrazné, na Úhlavě byly rozdíly větší. Projevil se zde vliv morfologie terénu, kdy zaříznuté koryto Otavy prakticky nedovoluje rozliv do inundace, ale Úhlava po vyběžení zaplaví téměř celé inundační území. Význam použití nástroje CroSolver se tedy nejvíce projeví ve výsledcích pro inundaci a také tam, kde lze díky zahloubení očekávat dostatečné zkapacitnění koryta pro převedení požadovaného průtoku.

Výsledky příspěvku ukazují, že nástroj CroSolver má dobrý potenciál využití. Další výzkum by mohl směřovat k porovnání zahloubených modelů přímo s modely založenými na geodetickém měření, popřípadně s odečtením průtoku naměřeného v době skenování. Zároveň by bylo vhodné provést rozsáhlejší porovnání vlivu morfologie a velikosti toku na výsledné rozdíly při použití nástroje CroSolver.

6. Literatura

Bharat, L. and Mason, D.C. (2001) Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, 100–120.

Brázdil, K. (2009) Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. *Geodetický a kartografický obzor*, 55 (97), č. 7, 145–151.

CroSolver (2014) CroSolver for ArcGIS, Nástroj CroSolver pro práci v prostředí ArcGIS, Ver 1.0 – Manual. online: <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>, cit. 9. 3. 2015.

ČHMÚ, (2015a) Evidenční list hlásného profilu Písek, online: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307230, cit. 18. 2. 2015.

ČHMÚ, (2015b) Evidenční list hlásného profilu Přeštice, Online. http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=2505279, cit. 7. 3. 2015.

Dolanský, T. (2004) Lidary a letecké laserové skenování. *Acta Universitatis Purkynianae*, 99, *Studia geoinformatica*. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, ISBN 80-7044-575-0.

Drbal, K., Štěpánková, P., Levitus, V., Říha, J., Dráb, A., Satrapa, L., Horský, M., Valenta, P., Valentová, J., Friedmannová, L., (2012) Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Ministerstvo životního prostředí, 91 s. online: http://cde.chmi.cz/dokumentace/Metodika_mapovani_2012-03-13.pdf (cit. 24. 3. 2015).

Ernst, J., Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., and Piroton, M (2010) Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. *Natural Hazards*, 55 (2), 181–209.

HEC, (2010) HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, CA.

Charlton, M. E., Large, A. R. G., Fuller, I. C., (2003) Application of airborne lidar in river environments: the river Coquet, Northumberland, UK, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 299-306.

Lindenschmidt, K.E. (2008) Quasi-2D approach in Modeling the transport of contaminated sediments in floodplains during river flooding. Model coupling and uncertainty analysis. *Environmental Engineering Science*, 25 (3), 333–351.

Metodický pokyn (28181/2005-16000) k zadávání fotogrammetrických činností pro potřeby vymezení záplavových území v souvislosti s aplikací ustanovení § 66 odst. 1 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a vyhlášky č. 236/2002 Sb., o způsobu a rozsahu zpracování návrhu a stanovování záplavových území.

Novák, P., Roub, R., Hejduk, T. (2011) Využití hydrologického měření při tvorbě hydrodynamických modelů z dat leteckého laserového skenování. *Vodní hospodářství*, 61 (8), 297–302. ISSN 1211-0760.

Oršulák, T., a Pacina J., (2012) 3D modelování a virtuální realita. Ing. Tomáš Kukulenka, Ústí nad Labem.

Pavelka, K., (2009) Fotogrammetrie 1. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha, 200.

Podhoranyi, M., and Fedorcak, D., (2014) Inaccuracy introduced by Lidar-generated gross sections and its impact on 1D hydrodynamic simulations. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, issue 1, 1-11.

Roub, R., Hejduk, T., Novák, P., (2012) Využití dat z tvorby nového výškopisu území České republiky metodou leteckého laserového skenování při analýze a mapování povodňových rizik. *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 58/100, 4-8.

Roub, R., Urban, F., Havlíček, V., Novák, P., Hejduk, T., Bureš, L. a Reil A., (2015) Vývoj softwarových nástrojů CroSolver a CroSolver for ArcGIS pro přípravu výpočetní tratě hydrodynamických modelů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* 1/2005, ročník 57, 5-13.

Valenta, P. (2005) Využití numerických modelů proudění vody v protipovodňové ochraně. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

Valentová, J., Valenta, P., and Weyskrabová, L. (2010) Assessing the retention capacity of a floodplain using a 2D numerical model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (4), 221–232, ISSN 0042-790X.

Wehr, A., and Lohr, U., (1999) Airborne laser scanning – an introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82.