

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



## FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

---

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

OBOR ENVIRONMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ

**Využití leteckého laserového skenování při hydrotechnickém posuzování  
vodních toků**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Roub, Ph. D.

**Diplomant:** Adam Reil

PRAHA, 2013

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci „Využití leteckého laserového skenování při hydrotechnickém posuzování vodních toků“, jsem vypracoval samostatně na základě obstarané literatury a ostatních uvedených zdrojů.

V Praze dne 20. 4. 2013

.....

Adam Reil

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Radku Roubovi, Ph. D. za odborné vedení diplomové práce a pomoc při jejím zpracování.

Dále bych rád poděkoval Českému úřadu katastrálnímu a Povodí Vltavy s. p. za poskytnutí dat.

Výsledky publikované v diplomové práci vznikly za podpory Technologické agentury ČR, projektu TA02020139.

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá použitelností zeměpisných dat získaných z leteckého laserového skenování (LLS) pro hydrotechnické posuzování toků. Konkrétně se jedná o digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G), který je ve formě mříže 5 x 5 metru a měl by nahradit stávající výškopisné modely poskytované Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním. Výhodou LLS je rychlý sběr velkého objemu prostorových dat a hlavní nevýhodou oproti geodetickému měření je nižší přesnost. V prostředí software ArcGIS 10.1 byl na těchto datech vytvořen digitální model terénu použitý k tvorbě výpočetní geometrie vybraného úseku řeky Úhlavy v blízkosti obce Přeštice.

Na základě takto získané a geodeticky zaměřené geometrie toku byly sestaveny hydraulické modely za použití nekomerčního software HEC – RAS 4.1.0. Po provedení simulací průtoků korytem řeky Úhlavy došlo ke srovnání získaných výsledků. Z tohoto porovnání bylo zjištěno, jak vystihují data LLS skutečný terén popsaný geodetickým zaměřením a jestli se vůbec dají použít k modelování říčních toků.

**Klíčová slova:** Průtok, příčný profil, hydraulický model, LLS, HEC – RAS, povodeň, vodní tok

## Abstract

This thesis deals with the applicability of geographic data gained from airborne laser scanning (ALS) for hydrotechnical assessment of river beds. Specifically, the digital relief model 4th generation (4G DMR), which is in the form of a grid of 5 x 5 meters and should replace existing altimetry models provided by the Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre. The advantage of LLS is quick collecting large volumes of spatial data and main disadvantage is lower accuracy in comparison with geodetic survey. In the environment of ArcGIS 10.1 software was created on these data digital terrain model used to create computational geometry of selected reach of the Úhlava river near the village Přeštice.

Based on the thus obtained and geodetic survey of river geometry were constructed hydraulic models using a non - commercial software HEC - RAS 4.1.0. After the simulation of flow through the river bed of Úhlava the obtained results were compared. From this comparison was found how the data LLS depict real terrain described by geodetic survey and if ever can be used for the modelling of river flows.

**Key words:** Discharge, cross section, hydraulic model, LLS, HEC – RAS, flood, water course

# Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíle práce .....	9
3. Literární rešerše.....	10
3.1 Problematika povodní.....	10
3.2 Legislativní rámec v problematice povodňové ochrany.....	14
3.3 Opatření před povodněmi.....	17
3.4 Varovné systémy a povodňové plány.....	19
3.4.1 Automatický vyrozumívací systém.....	19
3.4.2 Povodňové plány.....	21
3.4.3 Povodňový informační systém.....	23
3.4.4 Povodňová kniha.....	23
3.5 Hydrologický monitoring.....	24
3.5.1 Kvantitativní monitoring tekoucích vod.....	24
3.5.2 Kvantitativní monitoring stojatých vod.....	25
3.5.3 Pozorování a měření.....	25
3.6 Hydrodynamické modelování.....	26
3.6.1 Hydrodynamické modely.....	28
3.6.2 Navazující software.....	29
3.7 Základní způsoby pořízení dat pro zpracování hydraulických výpočtů.....	33
3.7.1 Geodetické zaměření příčných profilů.....	34
3.7.2 Letecké laserové skenování (LSS).....	34
3.7.3 Fotogrammetrie.....	35
3.8 Současné digitální modely reliéfu (DMR) v ČR.....	35
3.8.1 Výškopisné databáze ve správě ČÚZK ( <a href="http://geoportal.cuzk.cz">http://geoportal.cuzk.cz</a> ).....	36
3.8.2 DMR ve správě Ministerstva obrany ČR (Dušánek, 2008).....	36
3.9 Projekt tvorby nového výškopisu ČR.....	37
4. Metodika.....	39
4.1 Vymezení zájmového území.....	39
4.2 Použité podklady.....	40
4.2.1 Hydrologická data.....	40
4.2.2 Mapové a výškopisné podklady.....	40

4.3	Práce v prostředí ArcGIS 10.1 .....	42
4.3.1	Tvorba datového modelu TIN .....	42
4.3.2	Tvorba geometrie v extenzi HEC – GeoRAS .....	43
4.3.3	Export geometrických dat .....	47
4.4	Sestavení modelu v prostředí HEC – RAS 4.1.0.....	47
4.4.1	Model s geodeticky zaměřenými profily.....	48
4.4.2	Model s příčnými profily získanými z LLS .....	51
5.	Výsledky práce.....	53
5.1	Porovnání příčných profilů z geodetického zaměření a LLS .....	53
5.2	Porovnání výstupů získaných z hydrodynamických modelů .....	54
5.2.1	Srovnání nadmořských výšek hladin .....	54
5.2.2	Srovnání průtočných ploch .....	55
5.2.3	Porovnání šířek v hladině.....	57
6.	Závěr a diskuze .....	59
7.	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	61
	Seznam obrázků a tabulek v textu.....	64
	Seznam příloh.....	65

# 1. Úvod

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

Pro kvalitu modelování jevů a stavů při povodních s využitím hydrodynamických modelů jsou zásadní vstupní data pro tvorbu výpočetní geometrie vodního toku. Tato práce se zabývá využitím výškopisných dat získaných metodou leteckého laserového skenování, které v současnosti zabezpečuje Český úřad zeměměřický a katastrální spolu s Ministerstvem obrany ČR. Samotným problémem dat z LLS je situace, kdy laserový paprsek není po dopadu na vodní hladinu zpět odražen, nýbrž je vodou pohlcen. Na základě dané skutečnosti dochází při zpracování dat z LLS ke ztrátě informace v místech, kde je souvislá vodní hladina. Tzv. mračno bodů, které je základním produktem LLS tak po transformaci naměřených hodnot do výškového zobrazení nepostihuje celý příčný profil koryta, ale pouze jeho část, kde došlo ještě k odrazu paprsku. Chybějící část koryta, která může s ohledem na svou kapacitu představovat významnou průtočnou plochu, může za povodňových situací převádět významný objem povodňové vlny. Nabízejí se dva způsoby, jak tento nedostatek zmírnit. Prvním je doplnění o známý průtok, který byl v době pořizování dat LLS dosažen a druhým přístupem je dodatečné zahloubení DMR připraveného z dat LLS o stanovený průtok v době snímkování.

Účelem této práce je porovnání dat z LLS bez použití dvou výše zmíněných doplňujících způsobů pro kvalitní, levnou a zároveň jednoduchou přípravu výpočetní geometrie vodních toků jako podkladu pro hydrodynamické modely.



## **2. Cíle práce**

Hlavním cílem diplomové práce je posouzení využitelnosti dat získaných leteckým laserovým skenováním při návrhu protipovodňových opatření ve srovnání s podklady pořízenými geodetickým zaměřením.

### 3. Literární rešerše

#### 3.1 Problematika povodní

Povodně představují přirozený hydrologický jev, který nás doprovází již od samotného počátku lidské existence. Povodeň je definována v podmínkách ČR vodním zákonem č. 254/2001 Sb. ve znění zákona č. 150/2011 Sb. jako přechodné výrazné zvýšení hladiny vodního toku nebo jiné povrchové vody, během kterého voda zaplavuje území mimo koryto toku a může působit škody. Příčin povodní je mnoho, přičemž ve vnitrozemských oblastech mezi ně patří např. nadměrné srážky, tání sněhové pokrývky, ucpání koryta ledovými krami, chybná regulace toků, či snížená průtočnost koryt vlivem sedimentů a nánosů. Příčinou vzniků povodní je rovněž náhlé uvolnění překážky (či naopak vznik bariéry) ve vodním toku - tzv. zvláštní povodně (protržení hráze přehrady, sesuv svahu během dešťů, vytvoření ledových bariér, nápěchů, atd.), kdy v důsledku uvolnění dochází ke zvětšení průtoku vody a vzdušnosti hladiny tak, že se voda z koryt vylévá a zaplavuje okolní území. V přímořských lokalitách navíc hrozí zvýšení hladiny moře, způsobené extrémními povětrnostními podmínkami (například hurikánem), nebo jsou pro přímořské oblasti typické sezónní větry (například monzuny) přinášející na pevninu silné deště. (<http://www.vuv.cz>)

Na území České republiky můžeme vyskytující se povodně rozdělit dle jejich původu a to na přirozené a zvláštní. K přirozeným povodním na našem území dochází zpravidla na jaře, v létě a v zimě.

Letní povodňové události jsou často způsobeny dlouhotrvajícími dešti. Další příčinou letních povodní jsou deště o krátké době trvání, ale zato o velké intenzitě. Povodně v daném období jsou ještě silnější, pokud je zem hodně zvlhčena, pak ztrácí schopnost zadržet další vodu a dochází po dopadu srážky k povrchovému odtoku. Podobný problém nastává také, když dešťům předchází delší období sucha, kdy je zem velmi vysušená a není schopna infiltrovat větší množství spadlých srážek.

V zimních a jarních měsících, především v podhorských lokalitách, dochází ke zvýšení stavů v tocích díky tání sněhové pokrývky při náhlém oteplení. Tento proces bývá často umocněn dešťovými srážkami. Dále v zimním období hrozí povodně zapříčiněny ledovými jevy, kdy nahromaděné ledové kry zahradí koryto

toku. V tomto případě bývá velmi obtížné v co nejkratší lhůtě uvést koryto do průtočného stavu. (PEJŠEK et BOROVCOVÁ, 2010)

Zvláštní povodně se rozumí povodeň, způsobená poruchou či havárií (protržením) vodního díla vzdouvajícího nebo akumulujícího vodu, nebo nouzovým řešením kritické situace na vodním díle vyvolávající vznik krizové situace na území pod vodním dílem.

Povodně nejsou jen problémem současnosti. Podle historických hydrologických záznamů byly velké povodně poměrně časté ve druhé polovině 19. století. Pak jejich výskyt pozvolna ustával a druhá polovina 20. století byla na výskyt velkých regionálních povodní již vysloveně chudá. Až ke konci století došlo na našem území k několika ničivým povodním, včetně povodně v červenci 1997, která byla svým rozsahem a důsledky největší povodní ve 20. století (KUBÁT, 2002).

Velikost a doba trvání povodně závisí zejména na velikosti povodí (větší povodí mívá větší specifický odtok a tím menší povodně), tvaru povodí (menší povodně bývají na řekách s protáhlým povodím), intenzitě a době trvání deště (pro vznik povodní mají větší význam přívalové deště), propustnosti půdy (propustnější půda lépe infiltruje vodu ze srážek a zmenšuje povrchový odtok) a na rozsahu a druhu porostu v povodí (hustá vegetace zadržuje více vody intercepce). Velikost povodně je ovlivněna také velikostí zátopového území, které umožňuje rozliti povodňové vlny do plochy a zmenšuje tak vodní stav, nebo přítomností přirozených či umělých nádrží, které vyrovnávají průtok zadržením vody. Jednoduché povodně mají jen jedno maximum a trvají obvykle krátce (několik hodin), složité povodně jsou delší (trvají několik dní až týdnů) a mohou mít několik maxim. (CHÁBERA et KOSSL, 1999)

Z historického hlediska jsou významné především tzv. letní povodně – způsobené dlouhodobými dešti, letní povodně - krátkodobé intenzivní srážky, zimní povodně – tání sněhové pokrývky, zimní povodně - ledové jevy.

Přehled přirozených povodňových událostí na území ČR od roku 1980 (<http://www.vuv.cz>):

- **Letní povodně – dlouhodobé deště**

  - červenec 1981 – povodí Berounky, Vltavy a Labe

  - srpen 1985 – povodí Odry, Moravy a Dyje

květen 1996 – povodí Opavy na Bruntálsku a Krnovsku, Břeclavsko

červenec 1997 – povodí Moravy, Odry a horního Labe

srpen 2002 – povodí Vltavy, dolního Labe a Dyje

květen, červen 2010 – povodí Moravy a Odry

▪ **Letní povodně - krátkodobé intenzivní srážky**

červen 1979 – povodí Stěnavy a horní Metuje, povodí Jílovského potoka

červenec 1987 - povodí Jílovského potoka, Dřevnice a Vsetínské Bečvy

červen 1996 – povodí Opavy na Bruntálsku

červenec 1998 – povodí Dědiny a Bělé na Rychnovsku

červenec 2002 – povodí Hodonínky (město Olešnice)

červen, červenec 2009 – povodí Odry, Moravy a Bečvy, Kamenice

srpen 2010 – Frýdlantsko (povodí Smědé a Olešky), Českolipsko

▪ **Zimní povodně – tání sněhové pokrývky**

březen 1981- horní a střední Labe, povodí Ohře, horní Morava

prosinec 1993 - horní Vltava, Otava

březen 2000 - povodí Jizery a horního Labe

březen, duben 2006 – povodí Dyje, Lužnice, Vltavy, Sázavy, Labe, Jizery

▪ **Zimní povodně - ledové jevy**

leden 1982 – povodí Berounky, Cidlina, Ohře,

únor 1985 – povodí Moravy, Dyje, Sázavy

únor 1996 – střední Svratka (obec Štěpánovice)

Z výše uvedeného výčtu je zřejmé, že jejich výskyt je značně nepravidelný. Povodně představují pro Českou republiku největší přímé nebezpečí v oblasti přírodních katastrof a mohou být i příčinou závažných kritických situací, při nichž vznikají nejenom rozsáhlé materiální škody, ale rovněž ztráty na životech obyvatel postižených území a dochází k rozsáhlé devastaci krajiny včetně ekologických škod. Tato skutečnost se potvrdila v České republice při povodních v létě r. 1997 (60 obětí na životech a za 62,9 mld. Kč škod), v srpnu 2002 (19 obětí na životech a za 70 mld. Kč škod). Uvedené povodně prokázaly, že lidská společnost je jimi stále silně zranitelná, a to i v důsledku urbanizace, technického rozvoje, vybavenosti sídel,

domácností a výstavby výrobních kapacit v záplavových územích v posledních sto letech. (PROCHÁZKOVÁ, 2005)

Právě povodně v roce 1997 a 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 – povodně 1997 Morava, povodně 2002 a 2006 Čechy, přívalové povodně na Novojičínsku a Jesenicku 2009 či přívalové povodně v severních Čechách 2010.

Z tohoto důvodu je věnována velká pozornost opatřením k ochraně před povodněmi, která mají takové situace předvídat, eliminovat jejich potenciál a organizačně je zvládat. Dle hlediska opatření k ochraně před povodněmi rozeznáváme preventivní opatření, opatření při nebezpečí povodně či v době povodně a opatření po povodni. Z pohledu ochrany životů a zmírnění škod na majetku občanů zaujímají výsadní postavení opatření preventivní, mezi která spadají činnosti, jako jsou povodňové prohlídky, příprava předpovědní a hlásné povodňové služby, organizační a technická příprava povodňové ochrany, ale především zpracování povodňových plánů. (PEJŠEK et BOROVCOVÁ, 2010)

### 3.2 Legislativní rámec v problematice povodňové ochrany

Jak již bylo naznačeno v české legislativě je pojem povodeň definován v § 64/1 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Jedná se o přechodné výrazné zvýšení hladiny vodních toků, nebo jiných povrchových vod, při kterém již voda zaplavuje území mimo koryto vodního toku a může způsobit škody. Také může jít o stav, kdy voda může způsobit škody tím, že z určitého území nemůže dočasně přirozeným způsobem odtékat či odtok je nedostatečný.

Vodní zákon neboli zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů vešel v platnost 28. června 2001 a poslední změna byla schválena v roce 2011. Jeho účelem je chránit povrchové a podzemní vody, stanovit podmínky pro hospodárné využívání vodních zdrojů a pro zachování i zlepšení jakosti povrchových a podzemních vod, vytvořit podmínky pro snižování nepříznivých účinků povodní a sucha a zajistit bezpečnost vodních děl v souladu s právem Evropských společenství. Dále zákon stanoví přispívat k zajištění zásobování obyvatelstva pitnou vodou a k ochraně vodních ekosystémů a na nich přímo záviselých suchozemských ekosystémů.

Vodní zákon upravuje právní vztahy k povrchovým a podzemním vodám, vztahy fyzických a právnických osob k využívání povrchových a podzemních vod, jakož i vztahy k pozemkům a stavbám, s nimiž výskyt těchto vod přímo souvisí, a to v zájmu zajištění trvale udržitelného užívání těchto vod, bezpečnosti vodních děl a ochrany před účinky povodní a sucha. V rámci vztahů upravených tímto zákonem se bere v úvahu zásada návratnosti nákladů na vodohospodářské služby, včetně nákladů na související ochranu životního prostředí a nákladů na využívané zdroje, v souladu se zásadou, že znečišťovatel platí.

Celkovou koncepci ochrany před povodněmi řeší v roce 2000 vládou stanovena a schválena Strategie ochrany před povodněmi na území České republiky.

Strategie ochrany před povodněmi je dokument, který na základě znalosti průběhů povodní a stávajících technických, organizačních a legislativních opatření formuluje návrhy a směry dalších možností k omezení jak rozsahu povodní, tak snížení jejich ničivých následků. Strategie vytváří rámec pro definování konkrétních postupů a preventivních opatření ke zvýšení systémové ochrany před povodněmi v České republice. Jejím cílem je rovněž vytvořit základ pro rozhodování veřejné

správy nejen při konkrétní realizaci opatření proti povodním, ale rovněž pro usměrňování rozvoje území.

Na základě provedených analýz povodňových situací v České republice i zahraničních zkušeností vychází z dokumentu Strategie ochrany před povodněmi v České republice (<http://www.mzp.cz>) z následujících zásad:

- pro efektivní omezení následků povodní je nejpodstatnější prevence,
- na zabezpečení realizace preventivních opatření ke snížení škodlivých následků povodní se musí podílet kromě státu také subjekty – ať na úrovni regionů, okresů, obcí anebo individuálních osob – vlastníků nemovitostí,
- efektivní preventivní opatření je nutné uplatňovat systémově v ucelených (hydrologických) povodích a s provázáním vlivů podél vodních toků,
- pro efektivní ochranu před povodněmi je třeba vycházet z kombinace opatření v krajině, která zvyšují přirozenou akumulaci a retardaci vody v území a technických opatření k ovlivnění povodňových průtoků,
- pro návrhy k ochraně před povodněmi je třeba využívat výstupy z moderních technologií matematického modelování (simulace) povodní, které zpřesňují vymezení rozsahu a průběhu povodní a zároveň dovolují posuzovat účinnost zvolených opatření podél celého vodního toku,
- s ohledem na charakter území a geografickou polohu České republiky je nezbytné řešit ochranu před povodněmi v mezinárodním kontextu, zejména v rámci stávajících mezistátních dohod o spolupráci v povodích řek přesahujících hranice státu,
- vzhledem k finanční náročnosti je zabezpečení účinné ochrany před povodněmi víceletý proces, kdy prioritou státního zájmu je podpora prevence oproti úhradě nákladů za škody způsobované povodněmi,
- Strategie je dokument s dlouhodobou platností otevřený pro doplňující návrhy, které budou reagovat na vývoj poznání a rovněž plnění navrhovaných opatření.

Základními dokumenty Evropské unie, které se dotýkají problematiky podvodní, byly přijaty již v roce 2005, kdy byl přijat Akční program EU pro zvládání povodňových rizik a byl impulsem k přípravě nové směrnice EU o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik. Touto směrnicí se rozumí Směrnice Evropského

parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládnání povodňových rizik, jejímž hlavním cílem je snížení povodňového rizika v jednotlivých zemích. Navazuje na Směrnici 2000/60/ES ze dne 23. října 2000 (Vodní rámcová směrnice), kterou se stanovuje rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky, která naopak vyžaduje, aby pro veškeré oblasti povodí byly v zájmu dosažení dobrého ekologického a chemického stavu vypracovány plány povodí.

Pro účely implementace Povodňové směrnice byla v České republice zřízena pracovní skupina „povodňová směrnice“ skládající se ze zástupců Ministerstva životního prostředí, Ministerstva zemědělství, Českého hydrometeorologického ústavu, Výzkumného ústavu vodohospodářského a státních podniků Povodí. Implementaci by měla být dokončena do roku 2015.

Právě Směrnice 2007/60/ES nařizuje členským státům Evropského společenství (od roku 2009 Evropská unie) postupně vyhodnotit povodňové nebezpečí a riziko odpovídajícím mapovým vyjádřením. Hlavním cílem této metodiky tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik je poskytnutí kvalitních podkladů pro kvalifikované rozhodování o využití území v rámci územního plánování i o potřebách a rozsahu opatření proti škodám vzniklým povodněmi. Součástí by také mělo být rozčlenění inundačních území podle stupně povodňového rizika a stanovení priorit pro použití protipovodňových opatření, stanovení záplavových území a aktivní zóny.



### 3.3 Opatření před povodněmi

Hlavním cílem ochrany před povodněmi je v dlouhodobém hledisku ochrana sídel. Jak již bylo v úvodu naznačeno, tato opatření dělíme dle zákona 254/2001 Sb. do tří dílčích celků. Jsou jimi preventivní opatření, opatření při nebezpečí povodně či v době povodně, opatření při nebezpečí povodně či v době povodně a opatření po povodni, která jsou stejně jako dvě předešlá neméně důležitá. Po opadnutí vody je nutné zaznamenávat průběh povodně pro jejich vyhodnocení, které poslouží k zhodnocení stávajících protipovodňových opatření a jejich následnému zdokonalení.

Mezi preventivní opatření řadíme stanovení záplavových území, vymezení směrodatných limitů stupňů povodňové aktivity, povodňové plány, povodňové prohlídky, příprava předpovědní a hlásné povodňové služby, organizační a technická příprava, vytváření hmotných povodňových rezerv či příprava účastníků povodňové ochrany.

Mezi opatření při nebezpečí povodně či v době povodně spadají činnosti předpovědní povodňové služby, činnosti hlásné povodňové služby, varování při nebezpečí povodně, zřízení a činnost hlídkové služby, vyklizení záplavových území, řízené ovlivňování odtokových poměrů, povodňové zabezpečovací práce, povodňové záchranné práce či zabezpečení náhradních funkcí a služeb v území zasaženém povodní.

Opatřeními po povodni se rozumí činnosti jako evidenční a dokumentační práce, vyhodnocení povodňové situace včetně vzniklých povodňových škod, odstranění povodňových škod a obnova území po povodni.

K efektivní ochraně před povodněmi jsou nezbytná opatření v krajině a technická opatření k ovlivnění průběhu a rozsahu povodní. Je nezbytné usilovat o vytvoření prostorové rovnováhy mezi hospodářským rozvojem a urbanizací území na jedné straně a potřebami využít toto území ke zpomalení odtoku a akumulaci vody na straně druhé. Veškerá opatření na ochranu před povodněmi musí sledovat dopad na životní prostředí. Mezi opatření v krajině patří především změny využívání pozemků, změny rostlinného pokryvu, zatravnění a zalesňování břehů a přirozených inundací, tvorba protieročních mezí a vegetačních pásů a změny ve strukturách krajiny prováděné za účelem zachycení vody v povodí a zpomalení

jejího odtoku. Nadměrná srážková činnost vyvolává kromě povodňové situace i nestabilitu svahů v postižené oblasti, která způsobuje velké škody jak na krajině, tak i na budovách a může zhoršit průběh povodně. Proto odborné sledování a vyhodnocování projevů nestability svahů a opatření pro stabilizaci sesuvů jsou považovány za nedílnou součást Strategie ochrany před povodněmi.

Opatření v krajině je nutné brát vážně, protože tvoří významnou část prevence, ale na druhou stranu nemůže být jejich účinek hlavně při extrémních povodňových situacích přeceňován. Těmito opatřeními lze snížit velikost průtoku velkých povodní řádově v procentech. Pro podporu realizace těchto opatření je nutné využívat stávající programy určené ke zlepšení stavu životního prostředí a jeho složek. Hlavním nástrojem pro jejich realizaci jsou především komplexní pozemkové úpravy. Realizace těchto opatření rovněž vyvolává náklady spojené s kupováním pozemků, úhradou újmy a nezřídka mohou vést také k potřebě zajistit náhradní pracovní příležitosti, neboť se dotýkají především zemědělců.

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).

Návrh protipovodňových opatření (PPO) v současnosti probíhá především formou technických opatření, bez ohledu na současné zlepšení hydromorfologického stavu vod dle požadavků Rámcové směrnice o vodách a bez ohledu na přirozenou transformaci povodňových průtoků v nivách vodních toků (ŠINDLAR, 2007).

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 (PUNČOCHÁŘ, 2005). V návaznosti na tyto katastrofické povodně byla přijata směrnice Evropského parlamentu a Rady (2007/60/ES z 23. října 2007) o vyhodnocování a zvládnutí povodňových rizik.

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 zastavení inundačních území, kde standardně jinak dochází k retardaci a akumulaci odtoku (BIČÍK et al., 2008; TRIMBLE, 2003).

### **3.4 Varovné systémy a povodňové plány**

#### **3.4.1 Automatický vyrozumívací systém**

Automatický vyrozumívací systém (AVS) je zařízení určené pro co nejrychlejší odevzdání důležité informace velkému počtu lidí prostřednictvím veřejné telefonní sítě a mobilní sítě. Při nebezpečí povodně se využívá pro vyrozumívání povodňových orgánů podle povodňového plánu a pomocí databáze ohrožených nemovitostí také pro vyrozumívání nemovitostí ohrožených povodní v konkrétních městech, pro které jejich vlastník či uživatel zpracoval podklady pro povodňový plán vlastníka nemovitosti a údaje z takto vytvořených podkladů jsou vedeny v databázi. (<http://www.povis.cz>)

Hlavní přednosti AVS:

- rychlý přenos hlasových informací současně několika osobám
- rychlý přenos SMS zpráv několika osobám
- záznam o proběhlém vyrozumění v podobě podrobného protokolu o vyrozumění
- potvrzení přijetí informace zvukovým záznamem nebo kódem (zpětná vazba)
- archivace zanechaných hlasových odkazů v počítači

AVS umožňují vyrozumívát s typem události hlasem, hlasem a SMS, pouze SMS či hlasem a v případě neúspěchu SMS. První typ představuje případ, který se používá při většině prováděných vyrozumění, ať se již jedná o zkušební vyrozumění či o vyrozumění při skutečných povodňových situacích. Druhý typ události hlas a SMS v sobě zahrnuje vyrozumění pomocí hlasového oznámení a v podobě zaslání SMS. Tento způsob nachází uplatnění při nutnosti zprostředkování dodatečných informací ke vzniklé situaci, jako jsou například upřesnění evakuačních míst, předpokládané časy kulminací, které nemusí být během hovoru přesně zaznamenány. Při vyrozumění pomocí samotné SMS dochází ke ztrátě zpětného potvrzení, kdy není možné doručení SMS nikterak potvrdit a z tohoto důvodu není v praxi ve velké míře používáno. Posledním typem události je varianta hlasem a v případě neúspěchu SMS.

Tyto možnosti zaručí, že i v případě nezastihnutí osob jim je zaslána alespoň SMS, kde jsou uvedeny nejdůležitější informace o možném povodňovém nebezpečí.

Rovněž volby potvrzení jsou velmi variabilní. Mimo typu SMS je možné volit mezi potvrzením hlasem, potvrzením kódem či volit variantu, kdy není potvrzení příjmu hovoru vyžadováno.

Při potvrzení hlasem je za potvrzení brán hlasový záznam, který na požádání volaná osoba zanechá. Ve většině případů je vyžadováno zanechání oznámení v podobě vyslovení svého jména a příjmení. Tato varianta oznámení, kdy je zanecháno jméno a příjmení, navíc následně slouží i při vyhodnocení vyrozumění obsluhou systému, kdy je možné zpětně kontrolovat zaznamenané jméno a příjmení v protokolech s údaji o obvolávané osobě. V praxi se využívá pouze tato varianta potvrzování.

Při potvrzení hovoru kódem je volaný účastník vyzván k zmáčknutí libovolné číslice svého telefonu, čímž je následně daná osoba klasifikována jako vyrozuměná. V důsledku prováděných zkoušek bylo zjištěno, že při volbě potvrzení hlasem docházelo ke zkreslení vyhodnocení proběhlého vyrozumění. Jednalo se o situace, kdy docházelo k vyrozumění dané osoby pomocí nahrání hlášky o nedostupnosti volaného či jiné systémové hlášky operátorů.

Možné je volit i další parametry vyrozumění, mezi které patří čas vyzvánění, počet opakování volání, intervaly mezi voláními jedné osobě, atd.

Důležité je také propojení aplikace pro záznamy vyrozumívání s mapovou nadstavbou, která může být součástí dPP měst. Základní mapovou vrstvu představují stanovená záplavová území pro průtoky  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ , které jsou získány z hydrodynamických modelů. Velkého významu nabývá vrstva ortofotomap, která je jedna ze základních podkladových map aplikace společně s plánem města. Do prostředí mapové nadstavby je možné zařadit libovolné vrstvy, které mohou být použity při obsluze. Jedná se především o vrstvu územního plánu, která slouží jako základní přehledová vrstva využití území v záplavové oblasti. Vhodné je rovněž začlenění technických map v podobě vrstev vedení elektrického napětí, kanalizací a jiných inženýrských sítí, poněvadž je nutné mít přehled o veškerých potenciálních nebezpečích, která mohou při povodních nastat.

Zároveň slouží k aplikaci postupného vyrozumívání od oblastí nejdříve zasažených povodní po oblasti, které budou zasaženy povodní až při samotné kulminaci povodňové vlny. Pro tento účel je vytvořena funkce na odčítání

přednastavených filtrů z mapy, aby nedocházelo k duplicitnímu vyrozumívání ohrožených nemovitostí.

Pomocí mapové aplikace, na kterou jsou napojeny jednotlivé nemovitosti z aplikace, které disponují zpracovanými podklady povodňového plánu vlastníka nemovitosti, je možné rovněž sledovat aktuální průběh vyrozumění již v jeho samotném průběhu. Jednotlivé nemovitosti jsou graficky vyobrazeny dle úspěšného či neúspěšného vyrozumění se zobrazeným datem a časem, kdy byla či nebyla nemovitost vyrozuměna. Vizualní vyobrazení, pomocí červeného telefonu (nemovitost nevyrozuměna) a zeleného telefonu (nemovitost vyrozuměna), poskytuje důležitou informaci o tom, kam případně poslat s dodatečnou informací hlídku městské policie. Pro tento účel jsou využívány rovněž protokoly vyrozumění z mapy, kde jsou k dispozici statistiky z provedeného vyrozumění, včetně tabulek o nevyrozuměných nemovitostech s uvedenou adresou.

V mapové nadstavbě je možné také vytvářet výstupní sestavy ohrožených nemovitostí dle jednotlivých výběrů. Jedná se především o výběry na základě umístění nemovitosti, kdy je možné vytvořit seznamy vyrozuměných a nevyrozuměných nemovitostí, seznamy dle druhů nemovitostí (byt, rodinný dům, garáž, chata), seznamy ohrožených osob v jednotlivých ulicích, sumarizační tabulky požadavků na pomoc či evakuaci, atd. (<http://www.povis.cz>, <http://www.mzp.cz>)

### **3.4.2 Povodňové plány**

Povodňové plány představují základní dokumenty, které obsahují údaje potřebné pro zajištění ochrany před povodněmi konkrétního územního celku, obce či objektu, pro které jsou zpracovány. V povodňových plánech jsou uvedeny jmenné seznamy, adresy a způsob spojení účastníků ochrany před povodněmi, úkoly pro jednotlivé účastníky ochrany před povodněmi včetně organizace hlásné a hlídkové služby. Obsahují také zpravidla mapy nebo plány, na kterých jsou zakresleny zejména záplavová území, evakuační trasy a místa soustředění, hlásné profily a informační místa. Obsah povodňových plánů se tak dělí na část věcnou, část organizační a část grafickou. (PEJŠEK et BOROVCOVÁ, 2010)

- *Věcná část* zahrnuje údaje potřebné pro zajištění ochrany před povodněmi určitého objektu, obce, uceleného povodí nebo jiného územního celku, směrodatné limity pro vyhlášení stupňů povodňové aktivity.

- *Organizační část* obsahuje jmenné seznamy, adresy a způsob spojení účastníků ochrany před povodněmi, úkoly pro jednotlivé účastníky ochrany před povodněmi včetně organizace hlásné a hlídkové služby.
- *Grafická část* obsahuje mapy nebo plány, ve kterých jsou zakresleny především záplavová území, evakuační trasy s místy soustředění, hlásné profily a informační místa.

Povodňovými plány územních celků se rozumí (Zákon 254/2001 Sb.):

- povodňové plány obcí, které zpracovávají orgány obcí, v jejichž územních obvodech může dojít k povodni
- povodňové plány obcí s rozšířenou působností (od 1. 1. 2003), které zpracovávají obce s rozšířenou působností ve svém správním obvodu
- povodňové plány ucelených povodí, které zpracovávají příslušné orgány krajů v přenesené působnosti úkolů státní správy ve spolupráci se správci povodí
- povodňový plán České republiky, který zpracovává Ministerstvo životního prostředí

Pro nemovitosti ohrožené povodněmi, které se nacházejí v záplavovém území nebo zhoršují průběh povodně, zpracovávají povodňové plány jejich vlastníci, popřípadě uživatelé. Rozsah území ohrožené povodní je stanoven v povodňovém plánu. U povodňových plánů územních celků zpracovatelé každoročně prověřují jejich aktuálnost zpravidla před obdobím jarního tání a toto prověření dokladují. U ostatních povodňových plánů zpracovatelé prověřují jejich aktuálnost při podstatné změně podmínek. Pokud z přezkoumání vyplyne potřeba úpravy nebo doplnění povodňového plánu, učiní tak zpracovatelé neprodleně. (PEJŠEK et BOROVCOVÁ, 2010)

Věcnou a grafickou část povodňového plánu územních celků a jeho změny zpracovatelé předkládají nadřízenému povodňovému orgánu k potvrzení souladu

s povodňovým plánem povodňového orgánu vyššího stupně. U povodňových plánů pozemků a staveb potvrzuje soulad povodňový orgán obce. Potvrzením souladu a přijetím se stává věcná a grafická část povodňového plánu závaznou. Organizační část povodňového plánu zpracovatelé průběžně aktualizují a poskytují ji k využití povodňovým orgánům a ostatním účastníkům ochrany před povodněmi. (Zákon 254/2001 Sb.)

### **3.4.3 Povodňový informační systém**

Od roku 2007 je vyvíjen za účelem ochrany před povodněmi Povodňový informační systém, který dále slouží povodňovým orgánům k zjednodušení a zrychlení přenosu informací v jednotné datové struktuře. Soustřeďuje data potřebná pro tvorbu povodňových plánů obcí, obcí s rozšířenou působností a krajů. Skládá se z více navzájem propojených modulů (např. digitální povodňová kniha, digitální povodňový plán, editor dat povodňových plánů nebo modulu ČHMÚ). (<http://www.povis.cz>)

### **3.4.4 Povodňová kniha**

Povodňová kniha je součástí povodňového plánu a je vedena a uložena na Odboru životního prostředí a zemědělství krajského úřadu. Existuje také digitální povodňová kniha, která je součástí povodňového informačního systému.

V období mimo povodeň se do povodňové knihy zaznamenávají údaje o provedených preventivních opatřeních např. výsledky povodňových cvičení, provedených školeních atd. Musí zde být také doložena každoroční aktualizace povodňového plánu. Přílohami povodňové knihy mohou být zápisy z jednání povodňové komise, fotodokumentace, DVD disky apod. Tyto materiály se opatří pořadovým číslem a v povodňové knize se uvede jejich popis a místo uložení.

Z pohledu ochrany životů a zmírnění škod na majetku občanů mají z hlediska zvládání povodňových událostí výsadní postavení opatření preventivní, a to v podobě organizační a technické přípravy povodňové ochrany. K analýze a mapování povodňových rizik slouží simulace 1D a 2D hydrodynamických modelů, které poskytují detailní představu o působení povodně v konkrétním terénu. (<http://www.povis.cz>)

### 3.5 Hydrologický monitoring

Využití hydrologické analogie je jedním ze základních způsobů kvantitativního vyhodnocení změn vodního režimu v povodí. Vychází z pozorování hydrologických jevů a pozorované zákonitosti se snaží dále zobecnit. Například opakující se zvýšení vodních stavů na jaře v důsledku oblevy a následného tání sněhové pokrývky.

Průtok vody představuje základní hydrologickou veličinu vyjadřující objem vody, který proteče daným profilem vodního toku za jednotku času.

Hydrologické měření je v ČR v kompetenci Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a podniků povodí. Hydrologický monitoring je možné rozdělit do dvou odlišných programů, které ovšem spolu úzce souvisí a vzájemně se ovlivňují. Prvním z programů je program kvalitativního monitoringu, který ovšem není uplatnitelný z hlediska schematizace vodního toku pro hydrodynamický model. Druhým z programů, který je již uvažován pro uplatnění při tvorbě geometrie do hydrodynamického modelu, je kvantitativní monitoring. Program kvantitativního monitoringu povrchových vod zahrnuje monitoring vodních toků a vybraných vodních útvarů stojatých vod, přičemž z hlediska využitelnosti pro hydrodynamický model je podstatné měření na vodních tocích.

Hlavní účely kvantitativního monitoringu dle ČHMÚ (2007):

- zjišťování a hodnocení stavu povrchových vod podle § 21 vodního zákona
- určení skupin vodních útvarů PV a analýzu vlivů a dopadů podle směrnice 2000/60/ES EU o vodní politice
- hodnocení dlouhodobých změn přírodních podmínek
- sestavení vodní bilance
- plánování v oblasti vod
- hodnocení odtokového režimu v povodí a jeho změn způsobených antropogenní činností

#### 3.5.1 Kvantitativní monitoring tekoucích vod

Monitorování tekoucích povrchových vod se provádí ve vodoměrných stanicích na vodních tocích. Umisťují se v hlásných profilech povodňové služby a slouží zároveň pro ochranu před povodněmi. Jsou vybaveny zařízeními měřící vodní stav a případně teplotu vody. Vodní stav je zaznamenáván kontinuálně, pokud se měří



i teplota vody tak se zaznamenává jednou za hodinu. V každém z monitorovaných profilů je systematicky prováděno hydrometrické měření průtoků, ze kterých se konstruuje měrná křivka.

Některé vodoměrné stanice slouží zároveň pro provozní potřeby správců vodních toků a operativní řízení soustav vodních děl. Tyto stanice jsou zpravidla vybaveny zařízením pro dálkový přenos měřených údajů. (ČHMÚ, 2007)

### **3.5.2 Kvantitativní monitoring stojatých vod**

Jako stojaté vody jsou při kvalitativním monitoringu považovány vodní nádrže, u kterých se provádí měření těchto hodnot: hladina vody v nádrži, objem vody v nádrži, velikost odtoku z nádrže. Měření hladiny vody se provádí zpravidla vodočtem a automatickým hladinoměrem. Velikost odtoku se stanovuje pomocí odtokového limnigrafu, případně se vypočítá podle polohy uzávěrů a provozu elektrárny. Výsledky měření zpracovává a eviduje vodohospodářský dispečink, případně správce nádrže. Měření potřebná pro provoz vodního díla dle požadavků technicko - bezpečnostního dohledu provádí správce nádrže. (ČHMÚ, 2007)

### **3.5.3 Pozorování a měření**

Pro potřeby pozorování vodních stavů na tocích jsou budovány v hlásných profilech vodoměrné stanice. Jejich součástí je většinou zařízení pro záznam vodních stavů doplněné o vodočetnou lať. Těmto zařízením sloužících pro kontinuální měření a záznam vodních stavů říkáme limnigrafy a stanicím, ve kterých jsou umístěny, se nazývají limnigrafické. Dle způsobu měření rozeznáváme limnigrafy klasické a moderní. (HRÁDEK et KUŘÍK, 2008)

Klasickým typem je plovákový limnigraf sestávající z měrného zařízení a plováku, který je zavěšen na většinou bronzovém pásu s protizávažím. Plovák je uložen v šachtě, která je s tokem propojena potrubím. Podle výšky hladiny se plovák pohybuje ve vertikální ose a jeho pohyb je spojitě zaznamenáván na diagramový papír neboli limnigram.

Mezi moderní limnigrafy řadíme tlakové, které snímají hydrostatický tlak, přes který se zjistí výška vodní hladiny nad tlakovým čidlem. Dalším je ultrazvukový limnigraf s ultrazvukovým senzorem. Umisťuje se buď na hladinu, nebo na dno, přičemž jako lepší se jeví instalace senzoru na dno, odkud lze určit vodní stav přesněji, protože jsou eliminovány vlivy různých nečistot plovoucích na hladině.

Naměřená data se ukládají do sběrné jednotky, ze které je možné dálkově data poslat (např. mobilní sítí nebo pomocí internetu). Dálkový přenos je důležitý pro získání aktuálních informací hlavně pro využití předpovědní služby. (HRÁDEK et KUŘÍK, 2008)

Měrné křivky vyjadřují závislost hloubky vody na průtocích ve vodoměrných profilech toků, přičemž se jedná o nelineární závislost s náhodnou složkou. Průtok je vždy nutné stanovit experimentálním měřením a následně tato data proložit křivkou.

Pro stanovení průtoků se užívá nepřímých metod například hydrometrování. Tato metoda spočívá v geodetickém zaměření průtočného profilu a následném měření hydrometrickou vrtulí, kde získáme z otáček vrtule bodové pole rychlostí. Z rychlostního pole stanovíme průměrnou profilovou rychlost a následně vypočítáme průtok. Takto zjištěné měrné křivky vystihují průtoky za běžných vodních stavů. Za extrémních povodňových situací nejsou většinou věrohodné, proto je potřeba tyto křivky při vysokých vodních stavech extrapolovat pomocí složitějších metod. (HRÁDEK et KUŘÍK, 2008)

Při návrzích a výpočtech vodních staveb, úpravách vodních toků a návrzích protipovodňových opatření je potřeba znát takzvané N- leté průtoky (návrhové průtoky Q). Jedná se zpravidla o maximální průtoky, které byly dosaženy nebo překročeny jednou za N let. Právě při ochraně před povodněmi se většinou uvažuje průtok, který byl dosažen nebo překročen jednou za 100 let (možno označit Q100). Samozřejmě se návrhové průtoky používají dle potřeb projektů. (SOMMER, 1985)

Návrhové průtoky se stanovují na základě křivky překročení. Jedná se o součtovou křivku rozdělení četností výskytu. To znamená, že pozorovaná data (průtoky) rozčleníme dle jejich výskytu a následně sečteme. Z křivky překročení jsme pak schopni stanovit, kolikrát byl v minulosti určitý průtok dosažen nebo překročen. (HRÁDEK et KUŘÍK, 2008).

### **3.6 Hydrodynamické modelování**

Pro simulace hydraulických jevů jsou užívány hydrodynamické modely, které nám umožní, na základě námi dodaných vstupních dat popsat a znázornit proudění vody v reálném prostředí. Nejčastěji jsou dle nároků na výstupy užívány jednorozměrné (1D), dvourozměrné (2D) modely (DHI, 2004). Dynamické modely

oproti stacionárním zohledňují retenční objem, zaplavování a vysoušení řešených území, přičemž jejich výsledky věrněji popisují realitu.

Hydrodynamickými modely můžeme řešit tyto druhy proudění podle závislosti na čase:

#### *Ustálené (stacionární) proudění*

Při ustáleném proudění jsou všechny charakteristiky proudu v čase konstantní a závisí tedy pouze na poloze částice. Ustálené proudění může být rovnoměrné, což znamená, že kromě průtoku jsou konstantní i parametry koryta (tvar, drsnost, rychlost atd.). Nebo se může jednat o nerovnoměrné proudění, kdy je průtok konstantní, ale všechny ostatní charakteristiky koryta jsou po jeho délce proměnné. (BOOR et al., 1968)

#### *Neustálené (nestacionární) proudění*

Za neustáleného proudění jsou základní veličiny funkcí času a polohy. Při pomalu se měnícím neustáleném proudění dochází v korytě k šíření povodňové vlny. Výpočet postupivosti těchto vln odvodil v roce 1871 de Saint-Venant pro ideální kapalinu proudící v prizmatickém korytě. Výpočet je založen na dvou řídicích rovnicích – rovnice kontinuity a pohybové rovnici. De Saint-Venantovy rovnice bývají v upravených formách implementovány do hydrodynamických modelů (např. HEC-RAS, MIKE 11). Při rychle se měnícím proudění vznikají rázové vlny (příboj) a dochází k vzniku nespojitosti vodní hladiny, neboli k pohyblivému vodnímu skoku. Zde nelze k výpočtu užít výše zmíněných rovnic. (CHADWICK et al., 2004)

Jednorozměrné hydrodynamické modely se dají použít při modelování říčních systémů, pokud nepotřebujeme znát detailní rozdělení hydraulických parametrů (rychlostí, průtoků atd.) v příčném profilu. Z hlediska výškopisných dat jsou 1D modely méně náročné než 2D modely, protože k výpočtu postačí příčné profily koryta a inundace. Základem těchto modelů jsou de Saint - Venantovy rovnice (rovnice kontinuity a pohybová rovnice) pro neustálené proudění.

Použitelnost 1D matematických modelů se vyznačuje relativní jednoduchostí, dobrou interpretovatelností, kontrolou výstupů a s relativně malými nároky na vstupní data. Vstupní data jsou v daném případě omezena na požadavek, kdy je modelovaná oblast 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. Na základě daného zjednodušení v podobě použité schematizace je aplikace 1D modelů omezená. Oblast uplatnění je limitována především ve vazbě na hydraulické náročnosti místních podmínek. 1D modely lze bez problémů aplikovat v oblastech, kdy se proudění vyznačuje převážně jednorozměrným charakterem (paralelní proudění v toku a inundačním území, konstantní úroveň hladiny v příčném směru).

### 3.6.1 Hydrodynamické modely

Používaným jednorozměrným matematickým modelem pro simulaci proudění, kvality vody, srážkoodtokových procesů a pohybu splavenin v otevřených korytech a inundačních územích je model MIKE 11. Byl vyvinut dánskou organizací DHI Water & Environment a patří mezi nejrozšířenější produkt tohoto typu ve světě. Další možností využití tohoto modelu je možnost schematizace objektů na říčních sítích. Z hlediska hydrodynamiky je podstatné, že se zde dá simulovat kinematická, difúzní a dynamická vlna. Modelem, který doplňuje použití MIKE 11 je MIKE 11 GIS umožňující přímé napojení na GIS, tedy schematizaci a vizualizaci modelovaných toků nad mapovými podklady. (DHI, 2003)

Druhým standardně používaným modelem je HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), který je vyvíjený organizací U.S. Army Corps of Engineers americké armády. Je navržen pro komplexní modelování povrchových vodních toků včetně objektů, transportu znečištění a modelování teploty proudící vody. Vstupy pro výpočet jsou rozděleny do třech dílčích celků: geometrický popis koryta a objektů, hydraulické součinitele ztrát a okrajové podmínky. HEC – RAS představuje volně dostupný model. Program HEC-RAS dokáže řešit odtok za ustáleného i neustáleného proudění.

Při ustáleném proudění je výpočet méně náročný a stanovení podélných profilů hladin probíhá na základě  $N -$  letých vod. HEC-RAS zde řeší odděleně hydraulické režimy říčního a bystřinného proudění. Proudění objekty je zde řešeno podrobně a hodí se především tam, kde dochází k významnému ovlivnění proudění objekty. Ustálený model dává při řešení hladinového režimu o něco vyšší hodnoty, čímž je zajištěn bezpečný návrh. (BRUNNER et al., 2010). Výpočetní schéma ustáleného proudění je založeno na výpočtu nerovnoměrného proudění vody v korytech

metodou po úsecích. Program umožňuje rozdělení profilu na vlastní koryto (tzv. efektivní, neboli účinná oblast proudění) a levou či pravou inundaci. Stanovení průběhu hladin je v softwaru HEC – RAS postaveno na jednorozměrném řešení Bernoulliho rovnice (energy equation). Řešení energetických ztrát je řešeno v podobě ztrát třením (Manning's equation), přičemž místní ztráty jsou vyjádřeny pomocí koeficientů (contraction/expansion coefficients). Rovnice energie má tvar:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e, \quad (1)$$

kde  $Z$  jsou výšky dna a  $Y$  jsou hloubky vody v sousedních profilech,  $V$  jsou průměrné rychlosti v daných profilech,  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  rychlostní koeficienty,  $g$  je gravitační zrychlení a  $h_e$  energetická ztráta. (BRUNNER et al., 2010)

Hydraulicky komplikovaná místa v podobě přelivů, soutoků, bifurkací, mostů či propustků jsou řešena upravenou pohybovou rovnicí.

Numerické řešení neustáleného proudění je druhým případem jak řešit postup povodňové vlny modelem. Tato metoda simuluje průchod větších vod přesněji, ale je potřeba mít k dispozici podrobné informace o geometrii koryta, hydraulických parametrech a také tvaru vstupní vlny. Řeší de Saint – Venantovu pohybovou rovnici v úplném dynamickém tvaru numerickou metodou konečných diferencí s implicitním schématem. Jako nevýhoda se zde může ještě jevit výpočtová náročnost, či nestabilní chování při bystrinném režimu proudění. (BRUNNER et al., 2010)

### 3.6.2 Navazující software

Pro „komunikaci“ tohoto programu s geografickými informačními systémy (ArcGIS) slouží nástroje HEC-GeoRAS, pomocí kterých lze upravovat geometrická data získaná například z digitálního modelu terénu prostřednictvím systému ArcGIS a exportovat je do HEC-RAS. Výsledky získané v prostředí HEC-RAS lze samozřejmě prostřednictvím HEC-GeoRAS převést zpět do ArcGIS pro potřeby dalších úprav nebo jejich prezentace. (BRUNNER et al., 2010).

Pro řešení projektu je důležitá právě vysoká kompatibilita jednotlivých hydrodynamických modelů s prostředky geografických informačních systému především se softwarem ArcGIS, který byl vyvinutý společností ESRI a jedná se o nejkompaktnější GIS software světového měřítká. ArcGIS je integrovaný, otevřený a škálovatelný geografický informační systém, který ve své platformě disponuje výkonnými nástroji pro editaci, analýzu a modelování. Dále nabízí široké

možnosti v oblasti datových modelů a správy dat. Skládá ze tří klíčových částí, které zajišťují komplexní řešení GIS jakékoliv úrovně (ARCDATA, 2001):

- integrované sady aplikací GIS – ArcGIS Desktop
- rozhraní pro správu geodatabáze v DBMS – ArcSDE
- systém pro distribuci dat a služby GIS na internetu – ArcIMS

Samotná softwarová sada ArcGIS Desktop je složena z navzájem spolupracujících aplikací ArcMap, ArcCatalog a ArcToolbox. S využitím těchto tří aplikací lze provést jednoduchou i složitou GIS úlohu. (CHANG, 2012)

- ArcMap je centrální aplikace v ArcGIS Desktop. Je to GIS aplikace, použitelná pro všechny mapově orientované úlohy, včetně kartografie, prostorových analýz a editace dat.
- ArcCatalog slouží k organizaci a správě všechna data. Obsahuje nástroje pro prohlížení a vyhledávání geografických informací, zaznamenávání a prohlížení metadat, rychlé prohlížení libovolných datových sad a vytváření schématu struktury geografických vrstev.
- ArcToolbox je aplikace obsahující mnoho nástrojů GIS pro prostorové operace.

Tyto tři aplikace jsou k dispozici ve třech variantách lišících se funkčností a tvoří tak tři základní softwarové produkty ArcGIS Desktop: ArcView, ArcEditor a ArcInfo:

- ArcView poskytuje rozsáhlé nástroje pro tvorbu map a získávání informací z map, a jednoduché nástroje pro editaci a prostorové operace.
- ArcEditor má plnou funkcionalitu ArcView a navíc rozšířené editační možnosti pro coverage a geodatabáze.
- ArcInfo rozšiřuje funkcionalitu obou předchozích produktů o rozšířené prostorové operace.

Nespornou výhodou těchto tří produktů je jednotná architektura a uživatelské rozhraní. Všechny tyto produkty mají totožný přístup k datům, společné nadstavby a vývojové nástroje (ARCDATA, 2001).

Právě široká nabídka nástrojů, které Arctoolbox obsahuje, bude rozhodující při přípravě jednoho z plánovaných softwaru pro tvorbu geometrie vodních toků, která bude vstupem pro hydrodynamické modely.

Výhodou u 1D modelů je navíc skutečnost, že 1D modely umožňují také schematizaci podélných a příčných technických objektů v korytech, která není u 2D modelů ještě plně možná.

V rámci 2D modelů je nejčastěji používaný model MIKE 21C (DHI), který je založen na řešení Saint - Venantových diferenciálních rovnic (rovnice kontinuity a rovnice zachování hybnosti) metodou konečných diferencí v jednotlivých bodech půdorysné výpočetní sítě. Pracuje v neekvidistantní křivočaré síti, což znamená, že síť není pravouhlá, ale dokáže se přizpůsobit tvaru území (ČEJP et DUCHAN, 2008). V místech kde je potřeba znát detailní rozdělení hydraulických parametrů (okolí objektů) je možné síť zahustit. (DHI, 2004)

Hlavní výstupy z modelu MIKE 21C:

- a) výšky hladiny vody
- b) vektory rychlostí (směr a velikost vektorů rychlostí)

Tento 2D model nám tedy znázorňuje hladinu a rozdělení rychlostí a průtoků ve všech výpočetních bodech řešeného území. Vlastnosti proudění jsou především ovlivněny tvarem koryta a inundační oblasti, sklonovými poměry, drsností a tvarovými odpory jako je například zúžení (rozšíření) průtočného profilu, obtékání překážek, proudění přes objekty apod.). Výsledky proto velmi záleží na přesnosti souboru geometrických dat, protože v něm je obsažen jak reliéf terénu, tak data pro výpočet tvarových odporů (DHI, 2004).

Výsledky získané z hydrodynamických modelů jsou rozhodující pro vyjádření povodňových rizik a potenciálních škod. Právě pokud chceme těmito situacím předcházet a zároveň být na ně připraveni, je nutné mít formulované vhodné postupy a těmi se řídit. Takové postupy jsou pro členské státy Evropské unie nastaveny Směrnicí 2007/60/ES Evropského parlamentu a Rady o vyhodnocování a zvládnutí povodňových rizik, která ukládá členským státům pevnými časovými termíny povinnost vyhodnotit na jejich území povodňové nebezpečí i riziko a zpracovat je do mapového vyjádření.

DRBAL et al. (2008) uvádí jako základní kroky při zjišťování, posuzování a hodnocení povodňového rizika a potenciálu povodňových škod:

- identifikace scénářů nebezpečí (výskyt nežádoucího jevu)
- odhad pravděpodobnosti výskytu nepříznivých událostí (scénářů nebezpečí)
- stanovení zranitelnosti a kvantifikace dopadů
- kvantifikace rizika

Dále uvádí metody hodnocení povodňového rizika dle koncepce:

*Kvalitativní analýza* - identifikace posloupností událostí (scénáře nebezpečí), které představují potenciální události mající za následek škody a je třeba je samostatně posoudit a analyzovat. Podle výsledků analýz se určí typy nebezpečí a současně i části systému, kterým je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Následně se stanoví kontrolní seznamy.

*Kvantitativní analýza* - stanoví se pravděpodobnosti celkového stavu celého systému a zároveň se vyjádří jeho spolehlivost na základě pravděpodobnosti výskytu jednotlivých scénářů nebezpečí. Jako kvantifikátor se používá pravděpodobnost vzniku škody v rámci jednotlivého scénáře nebezpečí. Dále se stanoví intenzita povodně, kterou jsou vyjádřeny ničivé účinky povodně (nebezpečí), přičemž závisí především na rychlosti vody a hloubce zaplavení. Hodnocena jsou přímá i nepřímá poškození, přímé a nepřímé škody. Řeší se analýzy sociální, ekonomické i analýzy dopadů na životní prostředí, krajinu, či plošné využití inundačních území.

*Semikvantitativní analýza* – je mezistupněm mezi kvalitativní analýzou, kde není obsažena informace o míře povodňového rizika, a kvantitativní analýzou, která vyžaduje celkem obsáhlé a spolehlivé údaje, jež jsou dále předmětem statistického modelování. Výstupem semikvantitativního vyhodnocení je relativní výše rizika, která bývá obvykle prezentována číselnou stupnicí nebo barevnou škálou. K nejdůležitějším metodám patří metoda maximálního přijatelného rizika.

Rozsah potřebných dat ke stanovení map povodňového nebezpečí uvádí DRBAL et al. (2009):



- *Mapové podklady* slouží především pro orientaci v území. Jedná se hlavně o vrstvy sídel, komunikací, vodstva, vegetace a využití povrchu ze Základní báze geografických dat (ZABAGED<sup>®</sup>) a ortofotomapy.
- *Výškopisné podklady* jsou nezbytné pro tvorbu digitálního modelu terénu (DMT), pokud není k dispozici již vytvořený DMT. Zdrojem těchto dat je geodatabáze ZABAGED<sup>®</sup>, která poskytuje výškopis ve formě vrstevnic (3D vrstevnic). Vzhledem k přesnosti těchto výškopisných dat bude nejvhodnější použít data pořízena leteckým laserovým skenováním.
- *Hydrologická data* (N-leté průtoky) a *výsledné hydraulické výpočty proudění vody v záplavovém území* (mapy hloubek a rychlostí, kóty hladin, podélné a příčné profily, hranice rozlivů apod.)
- *Územně plánovací dokumentace dotčených obcí* má hlavní význam při současném řešení rizik v možnosti identifikovat funkční využití ploch v zájmovém území. Jsou k dispozici ve formě rastrových map (skenování tištěné dokumentace) a vektorových formátů (.dwg, .dxf, .shp, .dgn).

Výstupem těchto analýz jsou mapy ohrožení, které znázorňují v barevné škále rozdělená záplavová území dle míry ohrožení povodněmi. Dále jsou vytvářeny mapy rizika, které kombinují údaje o ohrožení s informacemi o zranitelnosti objektů v exponovaném území. Podle informací o využití území jsou určeny třídy ploch, kterým je přiřazena hodnota maximální přijatelného rizika. (DRBAL et al., 2008)

### **3.7 Základní způsoby pořízení dat pro zpracování hydraulických výpočtů**

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

Získat výškopisné údaje o korytech vodních toků a jim přidružených inundačních území lze více způsoby, které je navíc možné mezi sebou kombinovat. Mezi základní způsoby pořízení dat patří geodetické zaměření, letecké laserové skenování (LSS) a fotogrammetrie.

### 3.7.1 Geodetické zaměření příčných profilů

Jedná se o klasickou pozemní metodu, která je náročná z hlediska pracnosti a času a tím pádem i v konečném důsledku nejdražší z uvedených možností. Zároveň je to ale způsob, jak získat nepřesnější data a to v řádech centimetrů. Tato metoda bývá v poslední době využívána především pro zaměření objektů na tocích, profilů v hlubších vodách a k zaměření toků procházejícími například lesy, tedy v místech kde nejsme schopni získat přesné informace použitím fotogrammetrie nebo pomocí LSS. Používají se totální stanice, které slouží k měření a vytyčování vodorovných a svislých úhlů, délek a k registraci naměřených dat s možností matematických operací s těmito daty. (UHLÍŘOVÁ et ZBOŘIL, 2009)

Maximální vzdálenosti mezi jednotlivými příčnými profily se obecně pohybuje v rozsahu od několika desítek metrů až po stovky metrů s ohledem na variabilitu tvaru říčního koryta. 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 nejvýstižněji zachycena prostorová variabilita vodního toku a byly zachyceny všechny významné změny v geometrii koryta (změny příčného průřezu koryta, změny podélného sklonu apod.) (DRBAL et al., 2009).

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

### 3.7.2 Letecké laserové skenování (LSS)

LSS je jedním z nejmodernějších způsobů, kterými lze pořídit prostorová geografická data. Uplatňuje se zejména pro tvorbu digitálního modelu reliéfu (DMR), kde je zastoupen pouze rostlý terén, a digitálního modelu povrchu (DMP), který zahrnuje kromě terénu i stavby a vegetační pokryv. Tato metoda vychází po finanční stránce s ohledem na přesnost jako ekonomicky nejvýhodnější a i proto je často využívána především v západních zemích Evropy, dále v USA, či Kanadě. (UHLÍŘOVÁ et ZBOŘIL, 2009)

Letecký laserový skener (ALS - Airborne Laser Scanner) vyniká přesností, rychlostí a poskytuje možnost pro operativní použití (DUŠÁNEK, 2008; ŠÍMA, 2009) Řadí se mezi aktivní digitální senzory, protože přijímaný signál po odrazu je přímo převeden do digitální podoby, což značně zkracuje proces zpracování dat, se kterými se dále pracuje pouze s pomocí digitální techniky. ALS se skládá z laserové jednotky, skeneru, řídicí jednotky, a navigační jednotky (IMU – Inertial Measurement Unit) doplněné měřením GPS. (DOLANSKÝ, 2004).

Ve spojení s poměrně vysokým stupněm automatizace zpracování dat při vytváření digitálního modelu terénu a povrchu představuje jednu z nejefektivnějších metod pro získávání prostorových dat (DUŠÁNEK, 2008).

### **3.7.3 Fotogrammetrie**

Fotogrammetrie je vědní obor spadající pod geodézii a kartografii. Zabývá se určováním parametrů (tvar, rozměry, poloha) předmětů zobrazených na fotografických snímcích. Dříve se jednalo o fotogrammetrii analogovou, ale s příchodem digitální doby došlo k razantnímu vývoji tohoto oboru. Z pohledu leteckého mapování je letecká digitální fotogrammetrie vhodná především k mapování inundačních území, kde nehraje velkou roli přesnost, zde v řádech decimetrů. Zpravidla doplňuje geodetické zaměřování koryt toků a objektů na nich. (PAVELKA, 2009)

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. Obvyklá forma DMR v případě letecké fotogrammetrie je tvořena základní vrstvou 3D bodů, který je doplněn vyhodnocením významných terénních hran v podobě 3D linií. 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).

## **3.8 Současné digitální modely reliéfu (DMR) v ČR**

V současné době existuje celá řada výškopisných databází, které pokrývají vybraná území ČR, přičemž je k dispozici i několik digitálních modelů reliéfu různé

kvality, a to zejména v resortu ČÚZK a v resortu Ministerstva obrany ČR, které pokrývají celé území ČR. Dosud postrádaným produktem je digitální model povrchu, který je již delší dobu požadován uživateli zejména v resortech Ministerstva obrany ČR, Ministerstva vnitra ČR a Ministerstva dopravy ČR. Základní výčet uvádí BRÁZDIL et al. (2009).

Pojmem digitální model reliéfu (DMR) se rozumí digitální zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu formou výšek diskrétních bodů v pravidelně nebo nepravidelné síti nebo pomoci vrstevnic a terénních hran. Pojmem digitální model povrchu (DMP) se rozumí digitální zobrazení zemského povrchu včetně vertikálních geografických objektů (budov a jiných pozemních staveb, mostů, hrázi, lesů apod.) formou výšek diskrétních bodů v pravidelné nebo nepravidelné síti nebo pomoci vrstevnic a hran objektů.

### **3.8.1 Výškopisné databáze ve správě ČÚZK (<http://geoportal.cuzk.cz>)**

- ZABAGED® - 3D vrstevnice, která se vyznačuje aktualizovanými a zpřesněnými vrstevnicemi základní mapy 1:10 000. Vrstevnice jsou doplněny o klasifikované hrany a body (náspů, břehů, nádrží apod.) vyhodnocené stereofotogrammetrickou metodou při zpřesňování vrstevnicového výškopisu.
- ZABAGED® - grid 10x10 m je výškopisnou databází, která je odvozena do formy mříže (GRID) 10 m x 10 m.

Střední chyba výšky těchto databází se pohybuje v rozmezí 0,7 – 1,5 m v odkrytém terénu, 1 – 2 m v intravilánu a 2 – 5 m v zalesněných územích.

### **3.8.2 DMR ve správě Ministerstva obrany ČR (Dušánek, 2008)**

- DMR 2,5 generace je digitální model reliéfu s rozměry mříže (GRID) 100 m x 100 m. Střední chyba se zde pohybuje mezi 3 m – 5 m v odkrytém terénu, 5 m – 8 m v intravilánu a mezi 10 m – 15 m zalesněném území.
- DMR 3. generace je výškový model v podobě nepravidelné sítě TIN získaný stereofotogrammetrickou metodou a dosahuje středních chyb 1 m – 2 m v odkrytém terénu i intravilánu a 3 m – 7 m v zalesněných územích.

Jak dále uvádí BRÁZDIL (2011) jedním z hlavních nedostatků současných DMR je jejich nedostatečná přesnost a vysoká míra generalizace, která neumožňuje s požadovanou přesností interpretovat objekty mikroreliefu.

### **3.9 Projekt tvorby nového výškopisu ČR**

Tvorba nového výškopisu ČR metodou LLS je prováděna od počátku roku 2009. Je v kompetenci tří státních subjektů, kterými jsou Český úřad zeměměřičský katastrální (ČÚZK), Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo obrany (BRÁZDIL, 2009). Ministerstvo obrany zajišťuje letové hodiny speciálního fotogrammetrického letounu L 410 a zároveň zpracovává získaná data v rozsahu  $\frac{1}{4}$  území ČR. Ministerstvo zemědělství zajišťuje pronájem leteckého laserového skeneru včetně příslušenství a poskytne referenční výšková data z měřených profilů vodních toků. ČÚZK zabezpečuje řešení projektu a je zároveň hlavním koordinátorem. V neposlední řadě ČÚZK zajišťuje a v budoucnu zajistí trvalou správu dat (BRÁZDIL, 2009).

Metoda LLS je založena na principu odrazu laserových paprsků, které interpretují obraz měřených objektů jako mračno bodů. Přínosem této metody je rychlost měření, přesnost a množství měřených dat a informací. 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. 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 – terén, vegetace, zástavba, (chyby).

Letecké laserové skenování jev projektu nového výškopisu realizováno systémem LiteMapper 6800 od firmy IGI GmbH a využívá letecký laserový skener RIEGL LMS – Q680 s příslušenstvím pro autonomní určování polohy skeneru GPS (Global Positioning System) a IMU (Intertial Measurement Unit). Nosičem leteckého laserového skeneru je speciální letoun MO typu L 410 FG. Základní parametry skenování při tvorbě nového výškopisu ČR jsou charakterizovány hustotou bodů

větší 1,2 bod/m<sup>2</sup>, střední chyba měření rajonu  $\sigma < 0,03$  m, střední výška letu nad terénem 1400/1200 m, absolutní výšky letu v závislosti na relativní výšce a členitosti terénu, vzdálenost letových řad 830/715 m, příčný překryt od 35% do 50% (BRÁZDIL, 2009).

Plánovanými produkty z tvorby nového výškopisu ČR, které vzniknou po zpracování dat v různých časových obdobích, budou:

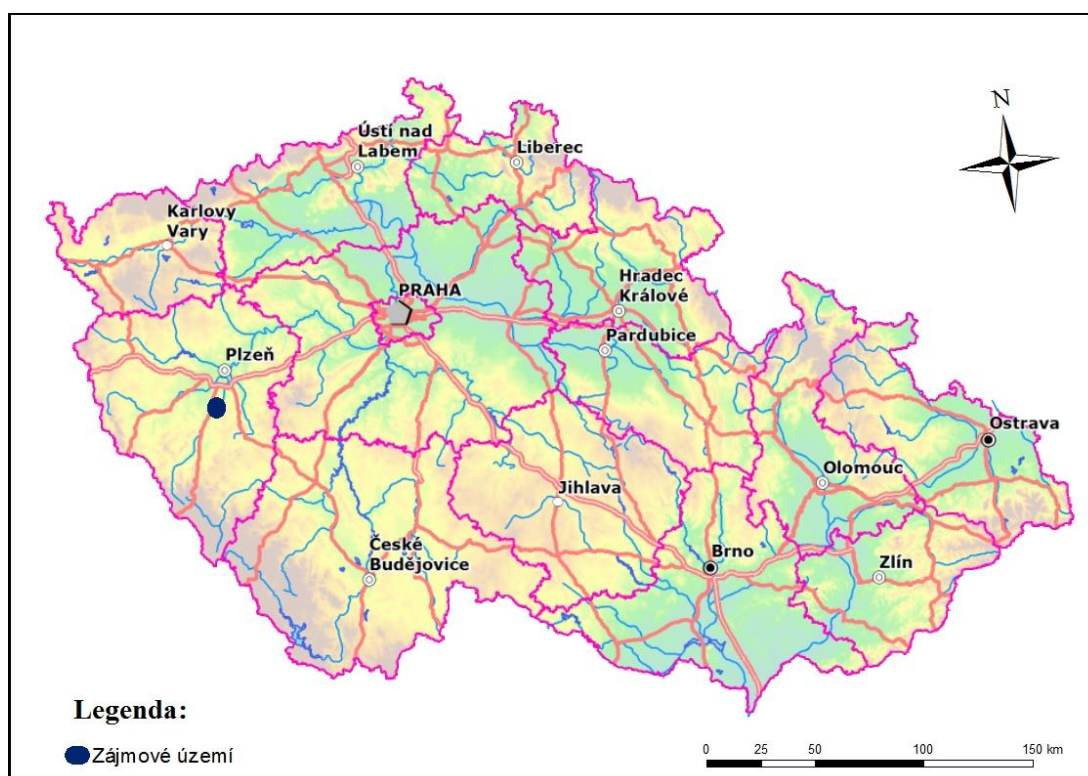
- **Digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G)** ve formě mříže 5 x 5 m s úplnou střední chybou výšky 0.30 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu (výsledek předběžného automatizovaného zpracování). (BRÁZDIL, 2010)
- **Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G)** ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0.18 m v odkrytém terénu a 0.30 m v zalesněném terénu (finální poloautomatické zpracování dat). (BRÁZDIL, 2012)
- **Digitální model povrchu 1. generace (DMP 1G)** ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0.4 m pro přesně vymezené objekty a 0.7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky rostlinného půdního krytu).

DMR 5G a DMP 1G se stanou základními výškovými modely území České republiky, když nahradí stávající výškopisné modely. Všechny tyto tři produkty jsou v současné době v procesu tvorby. Dokončení modelu DMR 4G je plánováno na konec roku 2013 a ostatní dva modely by měly být vyhotoveny nejpozději v roce 2015. (<http://geoportal.cuzk.cz>)

## 4. Metodika

### 4.1 Vymezení zájmového území

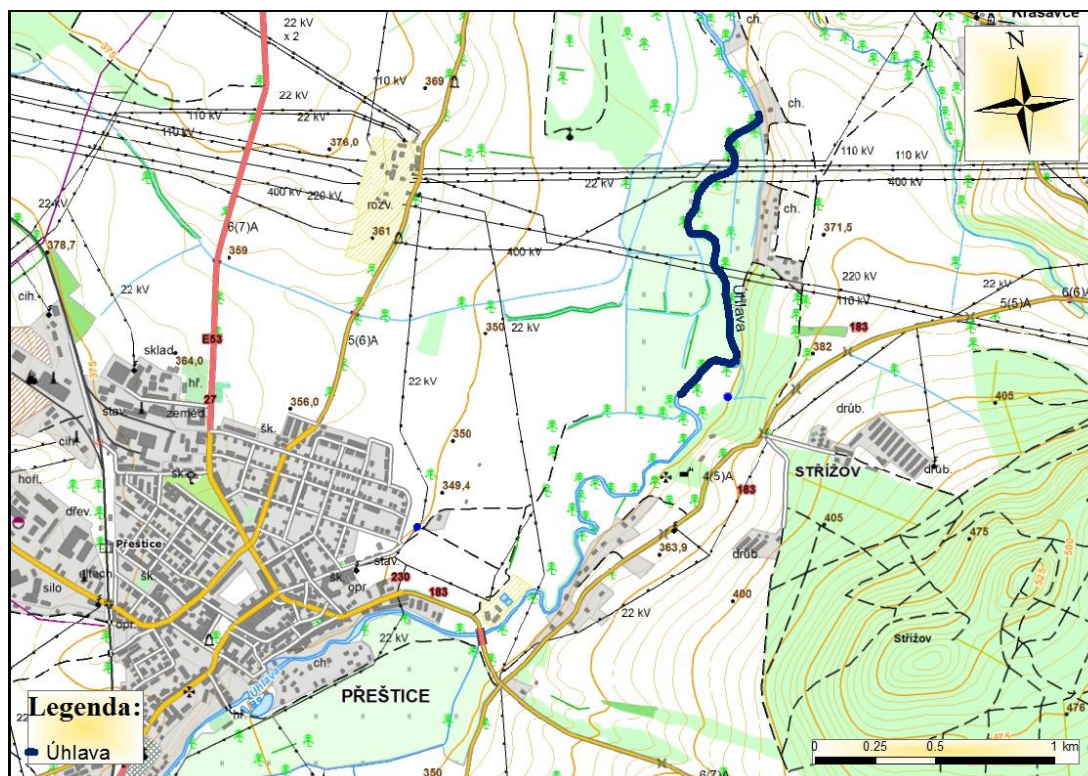
Z obrázku č. 1 je patrné, že zájmového území se nachází v blízkosti města Přeštice v Plzeňském kraji. Samotné město leží přibližně 20 kilometrů na jih od krajského města Plzeň a jeho geografická poloha je určena souřadnicemi  $49^{\circ}34'$  severní zeměpisné šířky a  $13^{\circ}19'$  východní zeměpisné délky (souřadnicový systém WGS – 84).



Obrázek č. 1: Zájmové území

Pro potřeby této práce byl vybrán úsek řeky Úhlavy, která protéká městem Přeštice. Řešený říční úsek je vymezen 27.750 a 29.361 říčním kilometrem. Při výběru úseku byla především hodnocena dostupnost geodeticky zaměřených příčných profilů poskytnutých státním podnikem Povodí Vltavy. Problém představoval nízký počet zaměřených profilů, proto byl zvolen tento říční úsek, který byl vyhodnocen jako nejschůdnější volba. Na vzdálenosti přibližně 1 600 metrů je zaměřeno šest příčných profilů, ale pro splnění cíle této práce je to dostačující počet. Samotný úsek řeky Úhlavy se nachází severovýchodně od města Přeštice a je znázorněn v obrázku č. 2.





Obrázek č. 2: Vybraný úsek řeky Úhlavy

## 4.2 Použité podklady

### 4.2.1 Hydrologická data

Pro účely této práce bylo nezbytné použít jako vstup do hydrodynamických modelů hodnoty  $N$  – letých průtoků, které byly poskytnuty Českým hydrometeorologickým úřadem. Hodnoty  $N$  – letých průtoků jsou uvedeny v *tabulce č. 1*. Pro doplnění průměrný roční průtok v uzávěrovém profilu Úhlavy na soutoku s řekou Radbuzou činí  $5,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

N - leté průtoky [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]							
N	1	2	5	10	20	50	100
<b>Průtok</b>	38.3	57.1	86.6	112	141	183	219

Tabulka č. 1:  $N$  – leté průtoky na řece Úhlavě v uvažovaném území (zdroj: ČHMÚ)

### 4.2.2 Mapové a výškopisné podklady

- *Geodetické zaměření* příčných profilů, které poskytl státní podnik Povodí Vltavy. Konkrétně se jedná o šest příčných profilů (*obrázek č. 3*), které zcela vystihují samotný tvar koryta řeky. Ale zaměření inundačního území je



neúplného a bylo nutné jej doplnit tak, aby byly všechny profily měly kapacitu pro provedení alespoň stoleté vody.



**Obrázek č. 3: Doplněné geodeticky zaměřené profily nad ortofotem ČR**

- *Výškopis* ve formě digitálního modelu reliéfu České republiky 4. Generace (DMR 4G), tedy v podobě bodů uspořádaných do mříže 5 x 5 metrů, získaný pomocí leteckého laserového skenování. Získané mračno bodů bylo tedy vyfiltrováno, právě do výše zmíněné bodové mříže. Tyto data poskytl Český úřad zeměměřičský a katastrální ve formátu XYZ v textovém souboru v kódování ASCII. Původně bylo v plánu zahrnout do této práce i digitální model reliéfu 5. Generace (DMR 5G), ale ten bohužel nebyl v době zpracování práce ještě k dispozici.
- *Říční mapa 1:2000* poskytnutá státním podnikem Povodí Vltavy byla použita pro získání polohopisu samotné řeky Úhlavy a břehových linií.

- *Digitální ortofoto České republiky* použité především jako prostředek především pro vizualizaci zájmového území a. Jedná se o fotografický obraz zemského povrchu. Ortofota jsou volně dostupná online jako datová vrstva z WMS serveru geoportálu Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního.

### **4.3 Práce v prostředí ArcGIS 10.1**

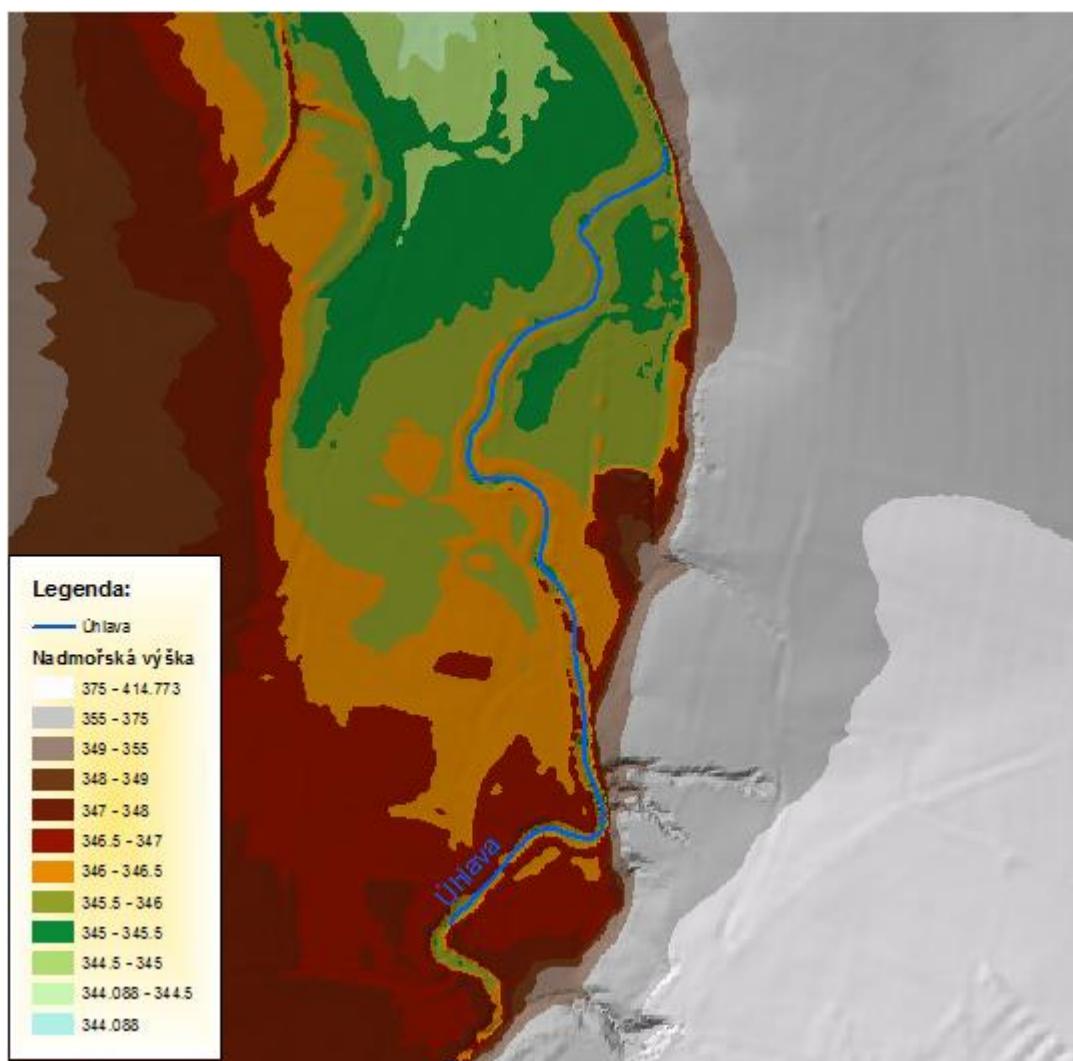
Pro samotnou práci byl zvolen tento software společnosti ESRI zejména pro jeho komplexnost, ale především kvůli možnosti propojení s hydrodynamickým programem HEC – RAS 4.1.0. Jejich propojení je uskutečněno přes extensi HEC – GeoRAS, kterou bylo nutné do ArcGIS doinstalovat. Tento geografický informační systém byl pro účely této práce použit k tvorbě digitální modelu terénu prostřednictvím datového modelu TIN. Dále byl použit k tvorbě výpočetní geometrie a v neposlední řadě k vizualizaci výsledků.

#### **4.3.1 Tvorba datového modelu TIN**

Jako základ k vytvoření tohoto modelu byla použita vrstva bodů DMR 4G. Model TIN (Triangulated Irregular Network) tedy reprezentuje zemský povrch formou nepravidelné trojúhelníkové sítě, ve které jsou výšky přiřazeny do vrcholů trojúhelníků.

Prvním krokem pro jeho tvorbu byl převod získaných dat DMR 4G do vrstvy pomocí extenze 3D Analyst, pro práci s trojrozměrnými daty. Konkrétně příkazem ASCII to Feature Class, kde byly nastaveny požadované parametry převodu.

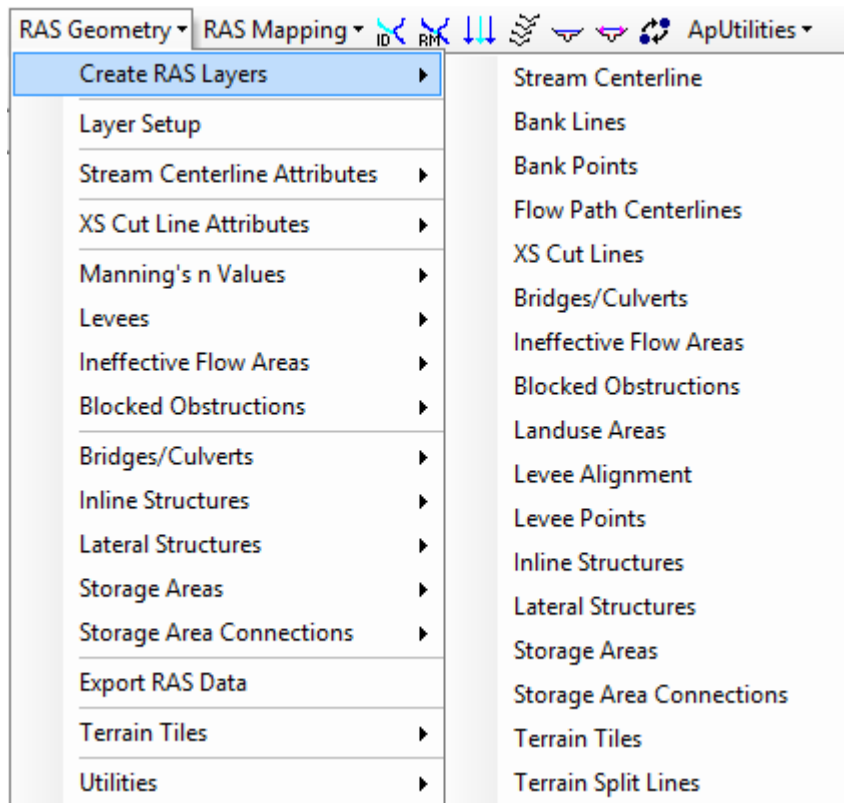
V druhém kroku byl vytvořen datový model TIN opět přes nástroje v 3D Analyst. Konkrétně přes TIN creation, kde byla použita funkce Create TIN. Vstupem byla bodová vrstva vytvořená z DMR 4G. Ukázka vytvořeného TIN modelu spolu se zaneseným úsekem řeky Úhlavy je na *obrázku č. 4*.



Obrázek č. 4: Ukázka modelu TIN pro zájmové území

#### 4.3.2 Tvorba geometrie v extenzi HEC – GeoRAS

Pro vytvoření nezbytných vstupů do programu HEC – RAS bylo potřeba využít GeoRAS (především záložku RAS Geometry) implementovaný do prostředí ArcGIS viz obrázek č. 5.



**Obrázek č. 5: Nástroje HEC - GeoRAS**

Samotné vytvoření geometrických dat (databáze) je vcelku jednoduché a postup se dá rozdělit na pár dílčích kroků:

1. Vytvoření vrstvy Stream Centerline – linii toku vektorizací řeky z mapového podkladu. Nutno vektorizovat po směru toku, protože se směr toku ukládá již zde. Nakonec je potřeba doplnit této vrstvě atributy jako ID, název toku, jeho délku a hlavně výšky z modelu TIN.
2. Vytvoření vrstvy Bank lines – břehové linie toku, které byly získány vektorizací nad říční mapou. Ukázka břehů a osy toku na *obrázku č. 6*.

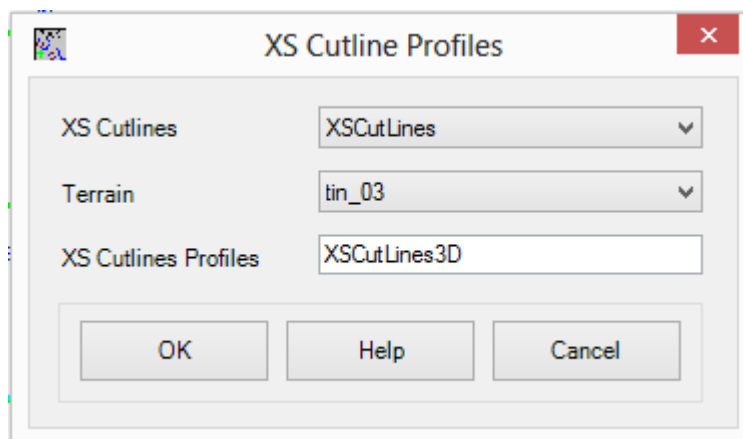


**Obrázek č. 6: Znáznornění vrstev Banks a Stream Centerline na ortofotem**

3. Tvorba vrstvy Flowpaths, která je totožná s vrstvou Stream Centerline
4. Nejdůležitějším krokem je editace vrstvy příčných profilů XS Cut Lines. Příčné profily je zde možno vytvořit automaticky, nebo ručně. V tomto případě bylo zvoleno ruční vykreslení, protože je nutné získat příčné profily v totožných místech, jako jsou ty geodeticky zaměřené. Samotné vytvoření tedy spočívalo ve vektorizaci nad vrstvou s geodeticky zaměřenými profily. Posledním krokem bylo použití záložky XS Cut Line Attributes, kde byl příčným profilům přiřazeny atributy:
  - River / Reach Names – přiřazení názvu řeky a úseku k jednotlivým profilům
  - Station – přiřadí každému profilu hodnotu staničení
  - Bank Station – určí vzdálenosti břehů na jednotlivých profilech
  - Downstream Reach Lengths – přiřadí ke každému příčnému profilu vzdálenost po směru toku k následujícímu profilu



5. Pro účely této práce bylo nejpodstatnějším atributem přiřazení výškové Z souřadnice z modelu TIN ke všem bodům příčných profilů prostřednictvím záložky Elevation (obrázek č. 7). Na základě výše zmíněných charakteristik vznikla konečná vrstva příčných profilů XS Cut Lines 3D, která je uvedena v obrázku č. 8.



Obrázek č. 7: Přiřazení hodnot nadmořské výšky profilům



Obrázek č. 8: Vrstva XS Cut Lines 3D nad ortofotem

V prostředí HEC – GeoRAS lze přidat i další údaje jako objekty, drsnosti, neprůtočné zóny, hráze a další. Některé z těchto údajů byly editovány až při modelování v prostředí HEC – RAS.

### **4.3.3 Export geometrických dat**

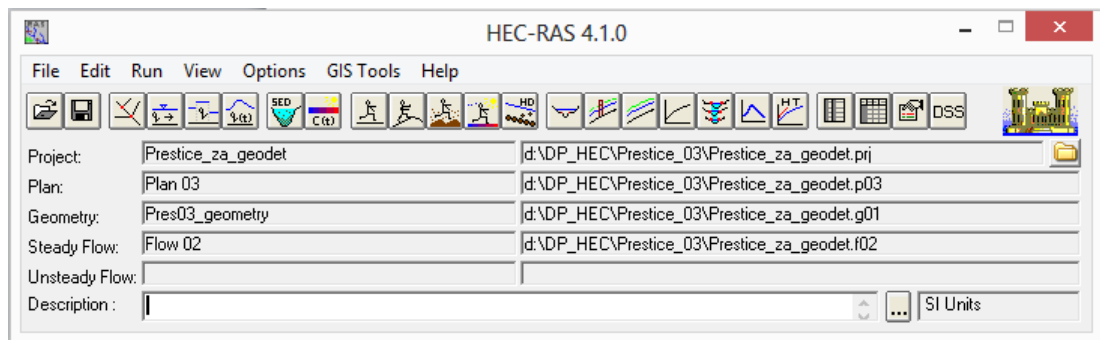
Geometrická data vytvořen v prostředí ArcGIS je nutné vyexportovat v odpovídajícím formátu, aby se dal použít v HEC – RAS. Nejprve se provede kontrola mapových vrstev (RAS Geometry / Layer Setup), které chceme exportovat. Pro samotný export dat byla použita záložka RAS Geometry / Export RAS Data (Extract GIS Data). Zde se určí cílová složka, kam bude exportní balík dat uložen ve dvou souborech formátu *.sdf* a *.xml*.

## **4.4 Sestavení modelu v prostředí HEC – RAS 4.1.0**

Za účelem porovnání výstupů z hydrodynamického modelu, byly sestaveny dva modely na základě různě získaných geometrických dat. Do prvního modelu byly použity doplněné geodeticky zaměřené příčné profily a druhý model byl postaven na výškopisných datech z leteckého laserového skenování. Oba modely se tedy liší pouze v zadávaných příčných profilech.

Podmínkou správné funkce programu je úvodní nastavení. Protože byl tento program vyvinutý v USA, je nejdříve potřeba nastavit tečku jako desetinný oddělovač a také změnit základní jednotky v hlavním menu na metrický systém SI.

Samotná práce v tomto programu je řešena v jednotlivých projektech, kde je pro každý projekt vytvořena soustava dílčích souborů. Jedná se o zvláštní soubory pro každý projekt, plán, geometrická data, okrajové podmínky, průběh výpočtu a výsledky pro každý plán. Výhodami této struktury jsou snadná aktualizace dat, možnosti jejich propojení v různých projektech, či evidence a ukládání různě nastavených průběhů výpočtů a výsledků jednotlivých projektů.



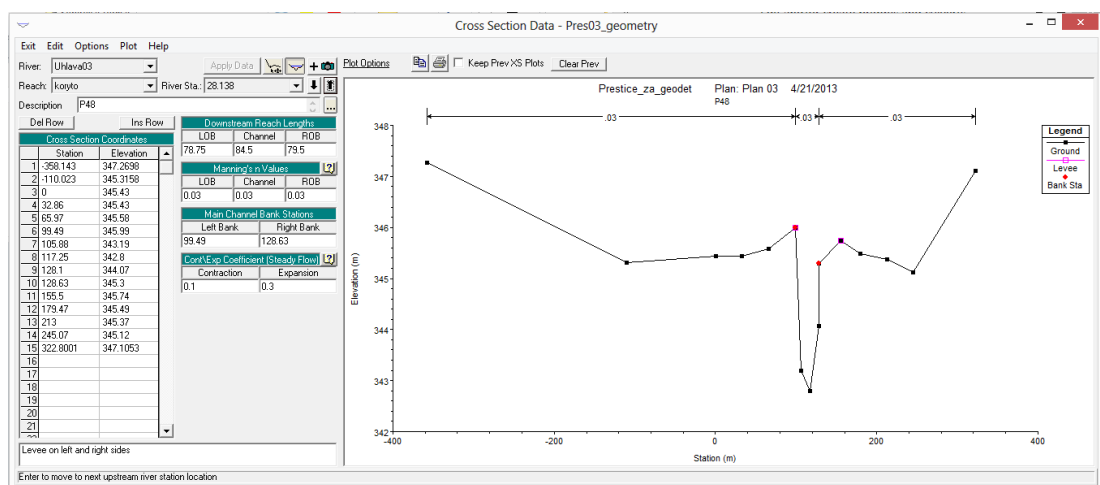
**Obrázek č. 9: Základní okno prostředí HEC - RAS**

#### 4.4.1 Model s geodeticky zaměřenými profily

Před zadávání příčných profilů je nejprve nutné vykreslit říční tok. V tomto případě byl úsek řeky Úhlavy importován z prostředí ArcGIS.

#### Zadání příčných profilů

Zadávání příčných profilů je prováděno v geometrickém editoru prostřednictvím záložky Edit / create cross sections (obrázek č. 10). Jako první se zadává staničení toku, na kterém se nachází upravovaný profil. Každý profil je určen souborem bodů a jim odpovídajících nadmořských výšek, přičemž staničení bodů profilu začíná nalevo při pohledu po směru toku. Dále musí být u každého profilu uvedena vzdálenost od předcházejícího profilu (vzdálenost levého břehu, osy toku a pravého břehu), což navazuje na určení samotných bodů břehových linií. Ještě se zde musí zadat také hodnota Manningova součinitele drsnosti. Na základě průzkumu byla zvolena konstantní hodnota 0,030 ve všech příčných profilech.

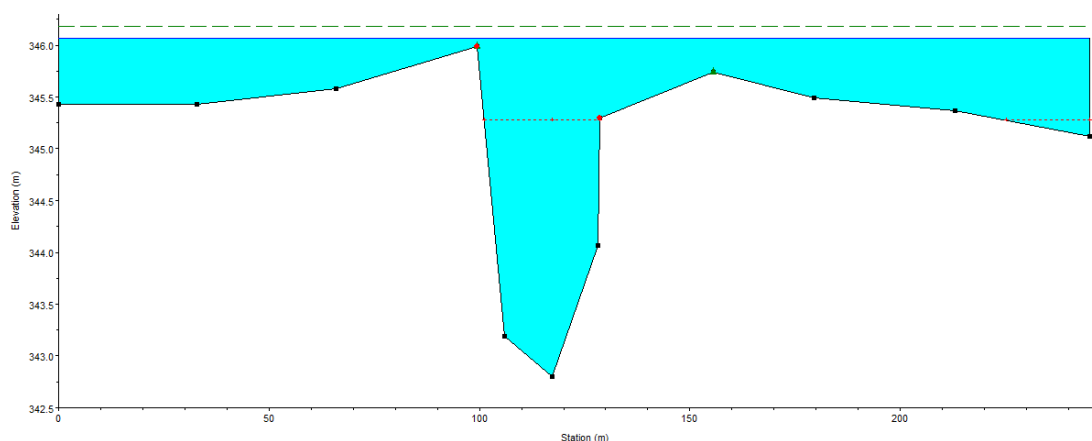


**Obrázek č. 10: Dialogové okno pro zadávání příčných profilů**

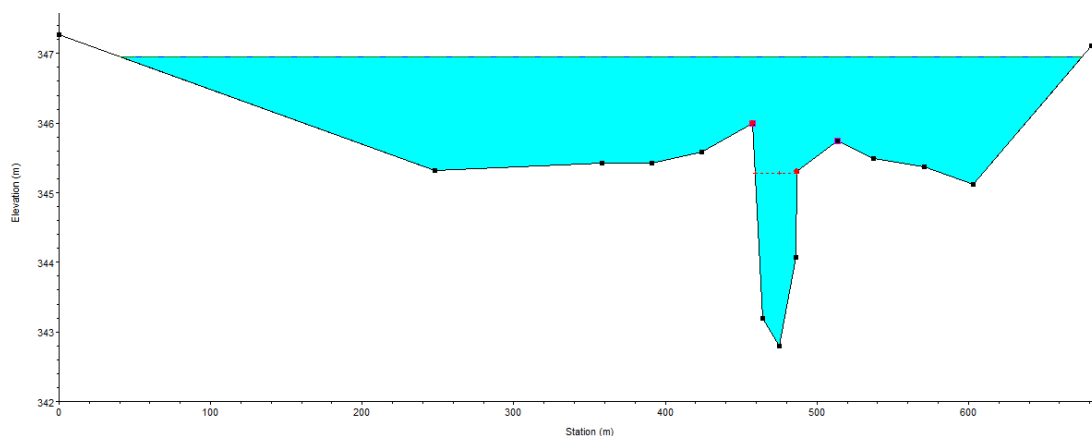


Právě při zadávání příčných profilů byla zjištěna nedostatečná kapacita příčných profilů, která se potvrdila po provedení simulací na požadované průtoky. Došlo k rozlivu vody z koryta do inundačního území, které již geodetickými body nebylo popsáno a došlo k razantnímu zkreslení výsledků. Řešením bylo prodloužení stávajících profilů na základě mapových podkladů a digitálního modelu terénu.

Pro názornost je uveden v *obrázku č. 11* příklad profilu s nedostatečnou kapacitou a na *obrázku č. 12* je stejný příčný profil doplněný o další body, tak aby bylo zaručeno převedení nejvyššího průtočného množství ( $Q_{100}$ ).



**Obrázek č. 11: Nedostatečně kapacitní profil**



**Obrázek č. 12: Doplněný příčný profil**

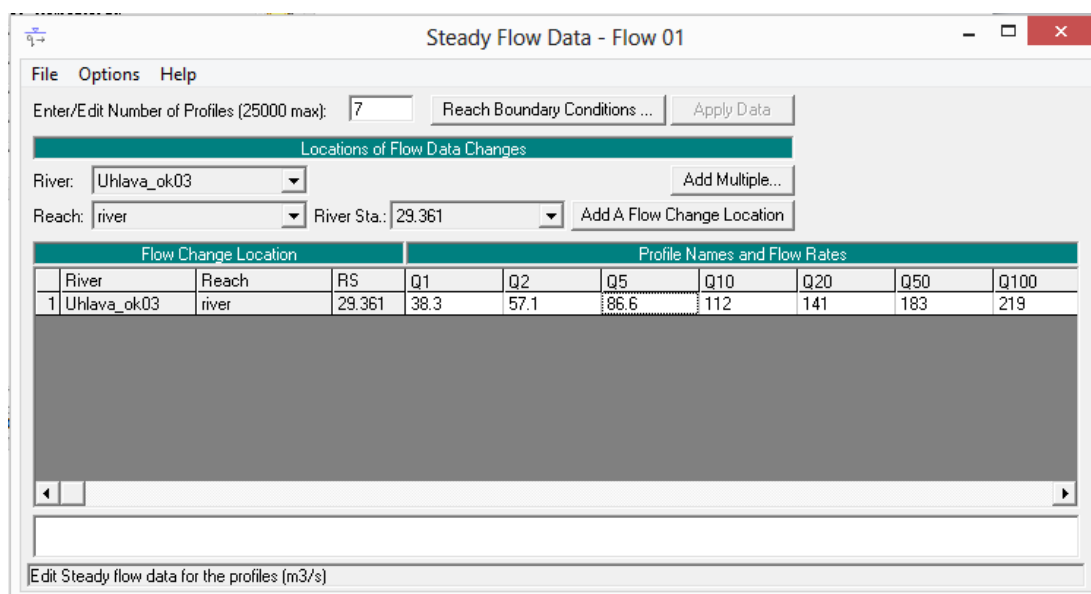
Dále program umožňuje zadat Ineffective flow area, tedy uživatelem vymezená pasivní průtočná oblast. Protože program uvažuje hladinu v délce celého profilu, takže může docházet k rozlivu z koryta do inundačního území, aniž by voda z koryta přešla přes břehovou linii. Právě v takových případech se hodí využít pasivní plochy, protože je program neuvazuje do průtočné plochy a uvažuje zde nulovou rychlost. A v případě, že hladina přesáhne danou mez, je pak s plochou počítáno jako s aktivní.

## Zadání okrajových podmínek

Vzhledem ke skutečnosti, že simulace byla provedena pro ustálené proudění, byly okrajové podmínky nadefinovány v sekci Steady Flow Data. Horní okrajové podmínky jsou dány N – letými průtoky ( $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ ) získanými z Povodí Vltavy s. p. Jako dolní okrajovou podmínku umožňuje program vybrat jednu z následujících možností v dialogovém okně Reach Boundary Conditions :

- *Known W. S.* – známá úroveň hladiny pro každý průtok v dolním profilu
- *Critical Depth* – kritická hloubka hladiny v dolním profilu
- *Normal Depth* – vypočítá měrnou křivku na základě zadaného sklonu hladiny
- *Rating Curve* – zadání známe konzumpční křivky

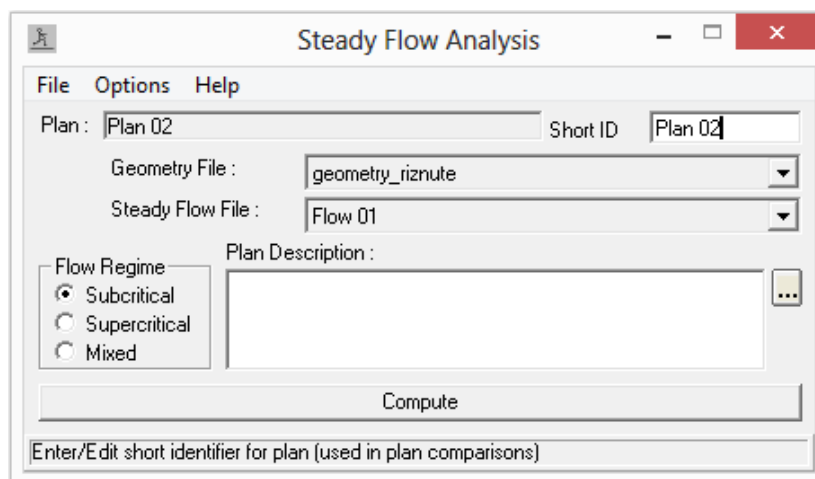
S přihlédnutím k dostupným datům byla zvolena dolní okrajová podmínka *Critical Depth*.



**Obrázek č. 13: Dialogové okno pro nadefinování okrajových podmínek**

## Výpočet ustáleného proudění

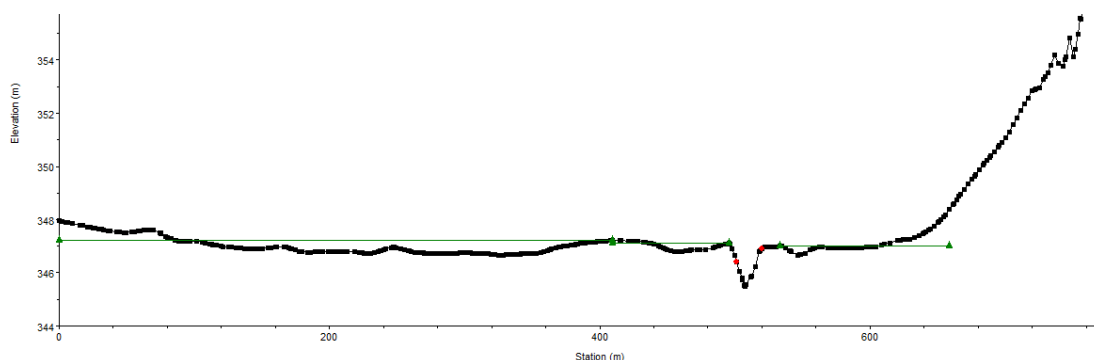
Pomocí ikony Run Steady Flow Analysis se otevře okno (obrázek č. 14) pro poslední nastavení před samotným výpočtem. Je zde na výběr řešení říčního proudění Subcritical, bystřinného proudění Supercritical a smíšeného Mixed. Dále se zvolí soubor s geometrickými daty a soubor s okrajovými podmínkami. Výpočet se provede tlačítkem Compute.



**Obrázek č. 14:** Okno pro výpočet ustáleného proudění

#### 4.4.2 Model s příčnými profily získanými z LLS

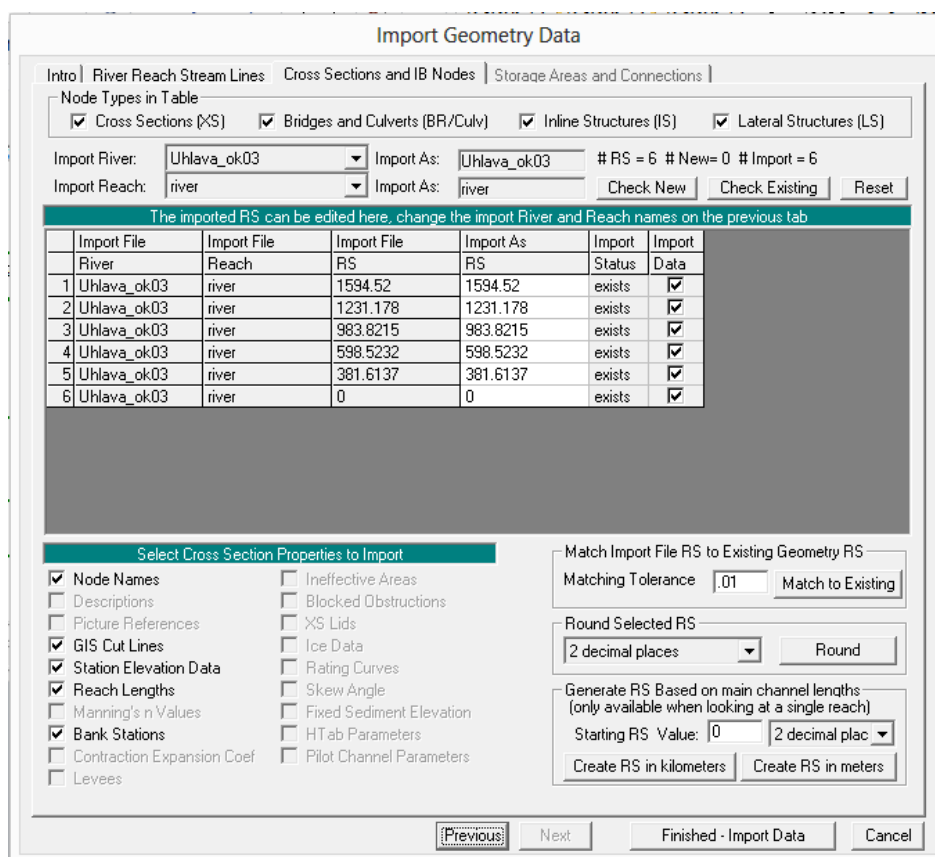
Oproti předchozímu modelu zde byla importována kompletní výpočetní geometrie z ArcGIS. Drsnost, okrajové podmínky a proces výpočtu byly nastaveny totožně jako v prvním modelu. Rozdíl spočívá tedy ve výškopisu území a poloze břehových linií, což je pro záměr této práce žádoucí. Navíc příčné profily sestávají z mnoha bodů oproti geodetickým, což vede k výstižnějšímu vyobrazení inundačního území.



**Obrázek č. 15:** Ukázka příčného profilu z LLS

#### Import geometrie do HEC – RAS

Načtení balíku exportovaného z ArcGIS se provede v pracovním prostředí Geometric Data přes záložku File / Import Geometry Data / GIS format. Otevře se importovací okno, ve kterém byla vybrána potřebná geometrická data viz *obrázek č. 16*.



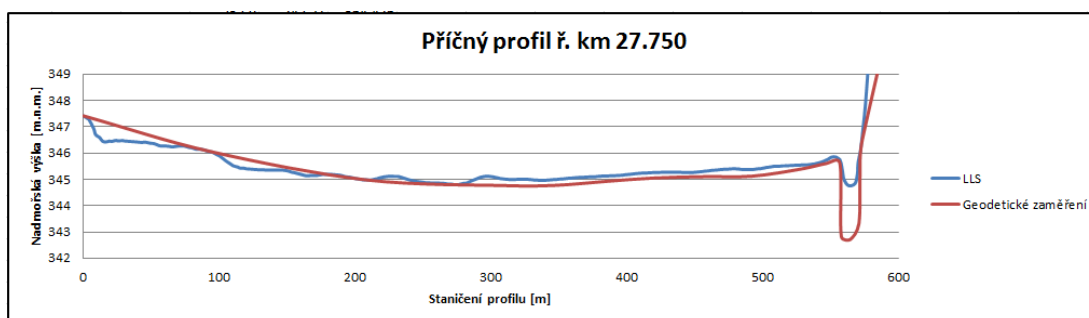
**Obrázek č. 16: Import geometrických dat**

Samozřejmě je potřeba definovat pasivní průtočné plochy, aby nedošlo ke zkreslení výsledných hodnot. Nakonec byl proveden výpočet obdobně jako u prvního modelu.

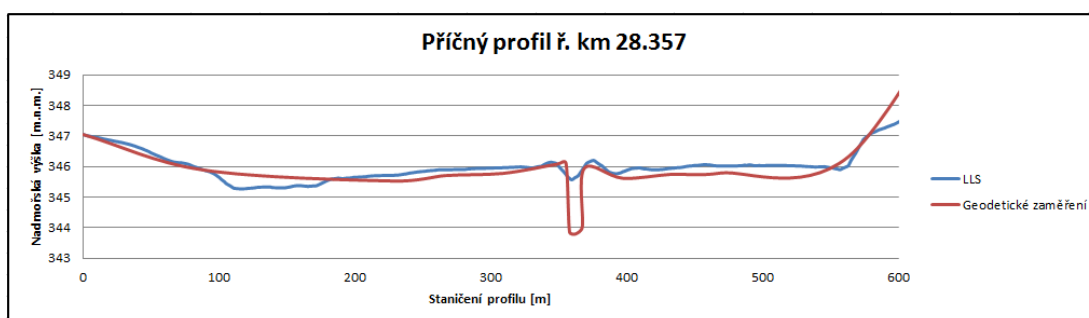
## 5. Výsledky práce

### 5.1 Porovnání příčných profilů z geodetického zaměření a LLS

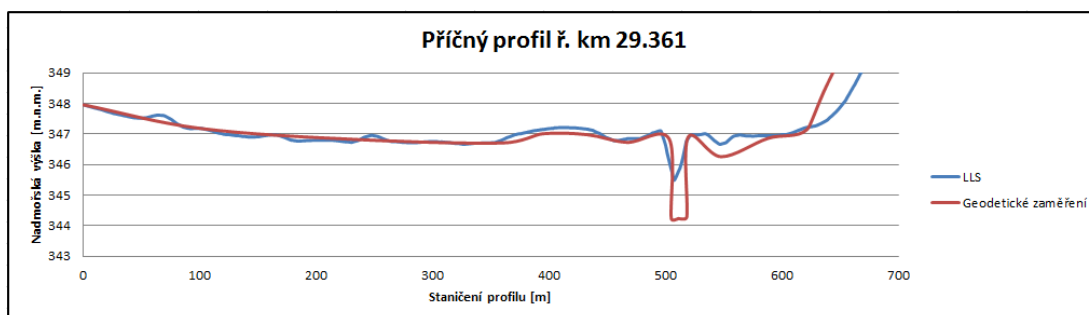
Pro začátek byly porovnány samotné tvary příčných profilů ze získaných dat. Jako ukázka byl zvolen počáteční, koncový a jeden profil mezi nimi.



Obrázek č. 17: *Dolní příčný profil*



Obrázek č. 18: *Příčný profil uprostřed*



Obrázek č. 19: *Horní příčný profil*

Z obrázků č. 17, 18 a 19 je patrné, že data z LLS nedokáží vystihnout reálný tvar říčního koryta. Tento problém je způsoben samotnou metodou pořízení dat, když

laser nepronikne skrz hladinu, ale odrazí se od ní. Proto rozdíl výšek, může dosahovat i několik metrů. Řešením tohoto nedostatku může být například zahloubení koryta toku.

## 5.2 Porovnání výstupů získaných z hydrodynamických modelů

V této části byly porovnány výsledné hodnoty pro N – leté průtoky. Jedná se o nadmořskou výšku hladin, šířku v hladině a plochu průtočného průřezu.

### 5.2.1 Srovnání nadmořských výšek hladin

Porovnání výšek hladin spočívalo ve výpočtu jejich rozdílů v každém profilu a pro každý N – letý průtok.

Staničení profilů	N - letost	Q	Výška hladiny - GZ	Výška hladiny - LLS	Rozdíl
[km]	-	[m <sup>3</sup> /s]	[m n.m.]	[m n.m.]	[cm]
29.361	Q <sub>1</sub>	38.30	346.59	346.84	25.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	346.97	347.26	29.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	347.14	347.25	11.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	347.22	347.32	10.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	347.31	347.37	6.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	347.39	347.45	6.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	347.47	347.50	3.00
28.994	Q <sub>1</sub>	38.30	346.18	346.54	36.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	346.51	346.76	25.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	346.67	346.79	12.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	346.80	346.91	11.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	346.86	346.93	7.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	347.04	346.99	5.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	347.10	347.05	5.00
28.746	Q <sub>1</sub>	38.30	346.03	346.46	43.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	346.46	346.63	17.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	346.57	346.76	19.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	346.77	346.83	6.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	346.80	346.88	8.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	346.97	346.91	6.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	347.01	347.09	8.00

28.357	Q <sub>1</sub>	38.30	345.14	345.61	47.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	345.38	345.84	46.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	346.28	346.16	12.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	346.31	346.26	5.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	346.36	346.58	22.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	346.93	346.79	14.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	346.96	346.87	9.00
28.138	Q <sub>1</sub>	38.30	344.78	345.58	80.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	345.21	345.79	58.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	345.80	346.12	32.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	345.97	346.22	25.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	346.33	346.42	9.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	346.93	346.72	21.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	346.95	346.85	10.00
27.750	Q <sub>1</sub>	38.30	343.84	344.59	75.00
	Q <sub>2</sub>	57.10	344.13	344.76	63.00
	Q <sub>5</sub>	86.60	344.52	344.98	46.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	344.83	345.11	28.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	345.14	345.28	14.00
	Q <sub>50</sub>	183.00	345.55	345.52	3.00
	Q <sub>100</sub>	219.00	345.62	345.58	4.00

**Tabulka č. 2: Přehled dosažených hodnot výšek hladiny a jejich rozdíl**

Při pohledu do tabulky č. 2 se potvrzuje, že spolu se zvyšujícím se průtočným množstvím se vypočtené hladiny přibližují. Je to především dáno, průtočným profilem koryta. Při nízkých průtocích jsou výšky velmi rozdílné, protože příčné profily z LLS jsou řádově plošší, tedy s razantně nižší kapacitou a dochází mnohem dříve k rozlivu do inundace.

### 5.2.2 Srovnání průtočných ploch

Porovnání průtočných ploch spočívalo ve výpočtu jejich rozdílů v každém profilu a pro každý N – letý průtok.

Staničení profilů	N - letost	Q	Průtočná plocha - GZ	Průtočná plocha - LLS	Rozdíl
[km]	-	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
29.361	Q <sub>1</sub>	38.30	34.41	53.93	19.52
	Q <sub>2</sub>	57.10	79.26	120.70	41.44

		Q <sub>5</sub>	86.60	192.66	193.70	1.04
		Q <sub>10</sub>	112.00	234.07	233.37	0.70
		Q <sub>20</sub>	141.00	279.49	263.37	16.12
		Q <sub>50</sub>	183.00	325.95	304.71	21.24
		Q <sub>100</sub>	219.00	365.28	335.26	30.02
	28.994	Q <sub>1</sub>	38.30	23.10	16.79	6.31
		Q <sub>2</sub>	57.10	36.26	31.12	5.14
		Q <sub>5</sub>	86.60	65.95	94.49	28.54
		Q <sub>10</sub>	112.00	104.58	115.84	11.26
		Q <sub>20</sub>	141.00	125.65	141.91	16.26
		Q <sub>50</sub>	183.00	198.91	203.91	5.00
		Q <sub>100</sub>	219.00	230.29	240.06	9.77
	28.746	Q <sub>1</sub>	38.30	55.67	149.77	94.10
		Q <sub>2</sub>	57.10	203.69	212.58	8.89
		Q <sub>5</sub>	86.60	253.07	249.79	3.28
		Q <sub>10</sub>	112.00	348.01	345.16	2.85
		Q <sub>20</sub>	141.00	388.10	369.79	18.31
		Q <sub>50</sub>	183.00	450.40	410.98	39.42
		Q <sub>100</sub>	219.00	471.07	447.03	24.04
	28.357	Q <sub>1</sub>	38.30	13.35	102.42	89.07
		Q <sub>2</sub>	57.10	16.23	154.39	138.16
		Q <sub>5</sub>	86.60	244.37	213.37	31.00
		Q <sub>10</sub>	112.00	259.81	244.73	15.08
		Q <sub>20</sub>	141.00	281.66	263.88	17.78
		Q <sub>50</sub>	183.00	589.33	468.11	121.22
		Q <sub>100</sub>	219.00	605.57	489.03	116.54
	28.138	Q <sub>1</sub>	38.30	37.80	163.33	125.53
		Q <sub>2</sub>	57.10	49.29	222.19	172.90
		Q <sub>5</sub>	86.60	116.97	241.24	124.27
		Q <sub>10</sub>	112.00	147.09	261.10	114.01
		Q <sub>20</sub>	141.00	458.06	384.97	73.09
		Q <sub>50</sub>	183.00	805.15	420.33	384.82
		Q <sub>100</sub>	219.00	821.45	551.32	270.13
	27.750	Q <sub>1</sub>	38.30	12.57	142.17	129.60



	Q <sub>2</sub>	57.10	16.65	174.51	157.86
	Q <sub>5</sub>	86.60	22.01	189.48	167.47
	Q <sub>10</sub>	112.00	26.48	202.83	176.35
	Q <sub>20</sub>	141.00	31.03	219.24	188.21
	Q <sub>50</sub>	183.00	37.18	243.91	206.73
	Q <sub>100</sub>	219.00	273.40	250.35	23.05

**Tabulka č. 3: Přehled velikostí průtočných ploch a jejich rozdíl**

I v případě průtočných ploch je nutné vycházet z toho, že u koryta zaměřeného pomocí LLS dojde podstatně dříve k jeho vybřežení.

### 5.2.3 Porovnání šířek v hladině

Srovnání šířek v hladině spočívalo ve výpočtu jejich rozdílů v každém profilu a pro každý N – letý průtok.

Staničení profilů	N - letost	Q	Šířka hladiny - GZ	Šířka hladiny - LLS	Rozdíl
[km]	-	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[m]	[m]
29.361	Q <sub>1</sub>	38.30	16.10	39.00	22.90
	Q <sub>2</sub>	57.10	377.01	454.02	77.01
	Q <sub>5</sub>	86.60	506.03	545.41	39.38
	Q <sub>10</sub>	112.00	526.81	547.04	20.23
	Q <sub>20</sub>	141.00	538.93	553.78	14.85
	Q <sub>50</sub>	183.00	551.05	553.12	2.07
	Q <sub>100</sub>	219.00	561.10	557.94	3.16
28.994	Q <sub>1</sub>	38.30	16.34	140.91	124.57
	Q <sub>2</sub>	57.10	118.09	348.51	230.42
	Q <sub>5</sub>	86.60	256.56	401.56	145.00
	Q <sub>10</sub>	112.00	322.07	478.63	156.56
	Q <sub>20</sub>	141.00	361.54	545.20	183.66
	Q <sub>50</sub>	183.00	488.06	587.53	99.47
	Q <sub>100</sub>	219.00	533.15	605.30	72.15
28.746	Q <sub>1</sub>	38.30	170.04	316.06	146.02
	Q <sub>2</sub>	57.10	439.02	396.47	42.55
	Q <sub>5</sub>	86.60	459.90	485.60	25.70
	Q <sub>10</sub>	112.00	494.03	502.85	8.82
	Q <sub>20</sub>	141.00	450.50	516.07	65.57
	Q <sub>50</sub>	183.00	528.38	534.68	6.30

28.357	Q <sub>100</sub>	219.00	535.04	546.48	11.44
	Q <sub>1</sub>	38.30	11.80	490.42	478.62
	Q <sub>2</sub>	57.10	12.26	495.13	482.87
	Q <sub>5</sub>	86.60	470.00	505.57	35.57
	Q <sub>10</sub>	112.00	476.49	510.49	34.00
	Q <sub>20</sub>	141.00	485.52	522.70	37.18
	Q <sub>50</sub>	183.00	565.70	547.95	17.75
	Q <sub>100</sub>	219.00	568.28	551.87	16.41
28.138	Q <sub>1</sub>	38.30	26.15	441.70	415.55
	Q <sub>2</sub>	57.10	27.31	482.54	455.23
	Q <sub>5</sub>	86.60	171.73	496.05	324.32
	Q <sub>10</sub>	112.00	178.85	541.70	362.85
	Q <sub>20</sub>	141.00	530.76	553.46	22.70
	Q <sub>50</sub>	183.00	630.10	575.69	54.41
	Q <sub>100</sub>	219.00	634.38	588.47	45.91
	27.750	Q <sub>1</sub>	38.30	13.63	254.63
Q <sub>2</sub>		57.10	13.87	289.89	276.02
Q <sub>5</sub>		86.60	14.18	314.03	299.85
Q <sub>10</sub>		112.00	14.43	343.48	329.05
Q <sub>20</sub>		141.00	14.68	385.14	370.46
Q <sub>50</sub>		183.00	15.28	411.07	395.79
Q <sub>100</sub>		219.00	432.41	469.80	37.39

**Tabulka č. 4: Přehled výsledných šířek v hladinách a jejich porovnání**

V rozdílech šířek v hladině je opět možné pozorovat, kdy teče voda korytem a kdy je rozlita v inundačních územích. Samozřejmě v geodeticky měřených profilech voda proudí v korytě přibližně do Q<sub>2</sub> včetně podle profilu, kdežto mělké koryto z LLS pustí vodu mimo koryto ještě v nižších průtocích než Q<sub>1</sub>.

## 6. Závěr a diskuze

Zpracovaná práce se věnuje problematice výškopisných dat a jejich použití v souvislosti s modelováním vodních toků a povodňových analýz. Hlavní úlohu při pořizování výškopisných dat hraje především jejich dostupnost, kvalita a cena. Nejpresnější je geodetické zaměření, které je ale i nejdražší a nejpomalejší metodou získávání geografických dat. Oproti němu nabízí letecké laserové skenování nejlepší poměr mezi rychlostí pořízení, cenou a kvalitou. A právě použití dat z LLS pro posuzování vodních toků, bylo předmětem této práce.

V oblasti vodních toků je v současnosti používáno pro zaměření koryt především geodetického měření a pro mapování inundačních území jsou data zpravidla pořizována leteckou fotogrammetrií. V celku novou metodou pořizování těchto dat na území České republiky je letecké laserové skenování (LLS) zemského povrchu. Konkrétně se jedná o digitální model reliéfu ČR 4. generace (DMR 4G).

Geodetické zaměření se vyznačuje vysokou přesností, pokud je provedeno správně. Právě tento předpoklad nebyl úplně splněn při pořizování geodetických dat, která byla poskytnuta Povodím Vltavy s. p. pro tuto diplomovou práci. Jedná se o zaměření příčných profilů ve velkých vzdálenostech od sebe, což je pro použití v hydrodynamických modelech velmi limitující proto bylo nutné provést interpolaci příčných profilů, která ale byla také omezena z důvodu členitosti toku. Další úprava profilů spočívala ve zvětšení průtočné kapacity, čehož bylo dosaženo prodloužením příčných profilů na základě DMT.

Z DMR 4G byly extrahovány příčné profily odpovídající svým polohopisem těm geodeticky zaměřeným, přičemž obsahovaly výškové souřadnice z digitálního modelu reliéfu.

Na těchto zeměpisných datech byly sestaveny dva hydrodynamické modely, které ozřejmily chování zájmového úseku Úhlavy při zatížení N – letými průtoky.

V přímém porovnání výstupů z těchto modelů, bylo zjištěno, že schematizace příčných profilů koryta na podkladech LLS je oproti geodetickému zaměření velmi nepřesná. Nedostatek je zapříčiněn neprostupností laserových paprsků vodní hladinou, takže získané body na toku jsou vlastně kótami vodní hladiny. Markantním rozdílem ve výškách hladin pomohl velkou měrou rovinný terén zájmového území,

protože zde hladina řeky více splyne se samotným terénem. Řešením tohoto problému může být dodatečné zahloubení koryta, nebo odečtení průtoku, který byl zjištěn v daném toce během pořizování dat LLS.

Když dojde k vybřežení vody i z geodeticky zaměřeného koryta začínají se hodnoty úrovní a šířek hladin postupně vyrovnávat, což nás přivádí ke zvážení možnosti použít data z DMR 4G spíše k mapování inundačních území, kde by mohly, díky své přesnosti a relativní jednoduchosti práce s nimi, nahradit leteckou fotogrammetrii.

Původním záměrem v této práci bylo porovnání ještě s digitálním modelem reliéfu 5. generace (DMR 5G), který by měl být přesnější než DMR 4G. Bohužel ale nebyl v době zpracování ještě k dispozici, proto je tato diplomová práce považována jako základ pro další pokračování v této problematice.

## 7. Přehled literatury a použitých zdrojů

- ARCDATA PRAHA. (2001): *Seznamte se s ARCGIS*. uživatelská příručka.
- 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.
- BOOR B. et al. (1968): *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. SNTL, Praha, 520 s.
- BRÁZDIL K. (2009): *Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky*. Geodetický a kartografický obzor, ročník 55 (97), č. 7, s. 145-151.
- BRÁZDIL K. et al. (2010): *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. Generace*. Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad.
- BRÁZDIL K. et al. (2012): *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. Generace*. Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad.
- BRUNNER G. W. et al. (2010): *River Analysis System HEC-RAS – User's manual*. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, CA.
- ČEJP J. et DUCHAN D. (2008): *Využití ArcGIS 9.x pro řešení úloh 2D proudění vody o malé hloubce*. Juniorstav, Vodní hospodářství a vodní stavby.
- ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘIČSKÝ A KATASTRÁLNÍ (ČÚZK), 2012, ZABAGED. online:  
[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(3yki5xrshz4wgsape0hreh22\)\)/default.aspx?mode=TextM eta&text=dSady\\_zabaged&side=zabaged&menu=24](http://geoportal.cuzk.cz/(S(3yki5xrshz4wgsape0hreh22))/default.aspx?mode=TextM eta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24). cit 5. 12. 2012.
- ČHMÚ (2007): *Program kvantitativního monitoringu povrchových vod v ČR*, Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- DHI (2003): *MIKE 11 – a Modelling System for Rivers and Channels – short description*. DHI Water & Environment, Horsholm, Denmark.
- DHI (2004): *MIKE 21 C river morphology – short description*. DHI Water & Environment, Horsholm, Denmark.

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

DRBAL K. et al. (2008): *Metodika stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území*. Ministerstvo životního prostředí, 77 s.

DRBAL K. et al. (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.

HRÁDEK F. et KUŘÍK P. (2008): *Hydrologie*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 280 s. ISBN 978 – 80 – 213 – 1744 – 4.

CHÁBERA S. et KÖSSL R. (1999): *Základy fyzické geomorfologie: přehled hydrogeografie*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, katedra geografie, 159 s. ISBN 80-7040-348-9.

CHADWICK A. et al. (2004): *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*. Spon Press, London, 644 s. ISBN 978-0-415-30609-6

CHANG, K. - T. (2012): *Introduction to geographic information systems*, McGraw – Hill, New York, 418 s. ISBN 978 – 007 – 108616 – 5.

KUBÁT J. (2002): *Problematika v předpovědní a hlásné povodňové službě*. In *Počasí : Krizové situace způsobené přírodními vlivy*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, s. 29-35. ISBN 80-7212-189-8.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR (MŽP ČR) (2012): online: *Implementace Povodňové směrnice*. [http://www.mzp.cz/cz/implementace\\_povodnove\\_smernice](http://www.mzp.cz/cz/implementace_povodnove_smernice). cit. 7. 12. 2012.

PAVELKA K. (2009): *Fotogrammetrie 1*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 200 s. ISBN 978 – 80 – 01 – 04249 – 6.

PEJŠEK M. et BOROVCOVÁ E. (2010): *Povodňový plán města Dvůr Králové nad Labem*. 65 s. „nepublikováno, dep: Městský úřad ve Dvoře Králové nad Labem“

POVODŇOVÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM - POVIS (2012): online: <http://www.povis.cz/html/>. cit. 6. 12. 2012.

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.

POVODŇOVÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM - POVIS (2012): online: <http://www.povis.cz/html/>. cit. 6. 12. 2012.

PROCHÁZKOVÁ D. (2005): *Řízení bezpečnosti, krizové řízení a plánování, ochrana kritické infrastruktury*. Praha: Regionservis, 89 s. ISBN 80-239-4452-5.

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik (povodňová směrnice).

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky.

SOMMER M. (1985): *Hydrologie*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 206 s.

ŠIMA J. (2009): *Abeceda leteckého laserového skenování*. Geobusiness. č. 3.

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.

UHLÍŘOVÁ K. et ZBOŘIL A. (2009): *Možnosti využití Laserového snímání povrchu pro vodohospodářské účely*. Vodní hospodářství, ročník 59, č. 12, s. 11 - 15.

VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA, 2012, online: <http://www.vuv.cz/index.php?id=993>. cit. 7. 12. 2012.

ZÁKON 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění zákona č. 150/2011 Sb.

## Seznam obrázků a tabulek v textu

<b>Obrázek č. 1:</b> <i>Zájmové území</i> .....	39
<b>Obrázek č. 2:</b> <i>Vybraný úsek řeky Úhlavy</i> .....	40
<b>Obrázek č. 3:</b> <i>Doplněné geodeticky zaměřené profily nad ortofotem ČR</i> .....	41
<b>Obrázek č. 4:</b> <i>Ukázka modelu TIN pro zájmové území</i> .....	43
<b>Obrázek č. 5:</b> <i>Nástroje HEC - GeoRAS</i> .....	44
<b>Obrázek č. 6:</b> <i>Znázornění vrstev Banks a Stream Centerline na ortofotem</i> .....	45
<b>Obrázek č. 7:</b> <i>Přiřazení hodnot nadmořské výšky profilům</i> .....	46
<b>Obrázek č. 8:</b> <i>Vrstva XS Cut Lines 3D nad ortofotem</i> .....	46
<b>Obrázek č. 9:</b> <i>Základní okno prostředí HEC - RAS</i> .....	48
<b>Obrázek č. 10:</b> <i>Dialogové okno pro zadávání příčných profilů</i> .....	48
<b>Obrázek č. 11:</b> <i>Nedostatečně kapacitní profil</i> .....	49
<b>Obrázek č. 12:</b> <i>Doplněný příčný profil</i> .....	49
<b>Obrázek č. 13:</b> <i>Dialogové okno pro nadefinování okrajových podmínek</i> .....	50
<b>Obrázek č. 14:</b> <i>Okno pro výpočet ustáleného proudění</i> .....	51
<b>Obrázek č. 15:</b> <i>Ukázka příčného profilu z LLS</i> .....	51
<b>Obrázek č. 16:</b> <i>Import geometrických dat</i> .....	52
<b>Obrázek č. 17:</b> <i>Dolní příčný profil</i> .....	53
<b>Obrázek č. 18:</b> <i>Příčný profil uprostřed</i> .....	53
<b>Obrázek č. 19:</b> <i>Horní příčný profil</i> .....	53
<b>Tabulka č. 1:</b> <i>N – leté průtoky na řece Úhlavě v uvažovaném území</i> .....	40
<b>Tabulka č. 2:</b> <i>Přehled dosažených hodnot výšek hladiny a jejich rozdíl</i> .....	55
<b>Tabulka č. 3:</b> <i>Přehled velikostí průtočných ploch a jejich rozdíl</i> .....	57
<b>Tabulka č. 4:</b> <i>Přehled výsledných šířek v hladinách a jejich porovnání</i> .....	58



## Seznam příloh

Příloha 1: Orientace ke svahům v zájmovém území

Příloha 2: Svažitost zájmového území

Příloha 3: Ukázka DMR 4G – grid 5 x 5 m

Příloha 4: Vybrané profily při  $Q_{100}$  – Geodetické zaměření

Příloha 5: 3D geometrie úseku Úhlavy  $Q_{100}$  – Geodetické zaměření

Příloha 6: Podélný profil úseku Úhlavy  $Q_{100}$  – Geodetické zaměření

Příloha 7: Vybrané profily při  $Q_{100}$  – LLS

Příloha 8: 3D geometrie úseku Úhlavy  $Q_{100}$  – LLS

Příloha 9: Podélný profil úseku Úhlavy  $Q_{100}$  – LLS

Příloha 10: Mapa zaplaveného území při  $Q_{100}$