Metodika řízení monitoringu a údržby VH infrastruktury

Doporučené metody zpracování výsledků měření morfologie dna vícepaprskovou ultrazvukovou metodou (VUM)

Číslo projektu: **QJ1520267**

Projekt: **Systém řízení monitoringu a údržby VH infrastruktury**

Program: Komplexní udržitelné systémy v zemědělství 2012-2018 „KUS“

Podprogram: Udržitelný rozvoj lesního a vodního hospodářství a ostatních oblastí zemědělství

Cíl podprogramu: Vytvořit systém optimalizace hospodaření s vodními a půdními zdroji v dlouhodobém horizontu včetně jejich bilancování v systému půda-rostlina-atmosféra, omezit dopady klimatických změn na zemědělské ekosystémy.

Vyhlašovatel: Ministerstvo zemědělství
Příjemce: VARS BRNO a.s.
Další účastníci: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.
Vysoké učení technické v Brně

Řešitelský tým:

Odpovědný řešitel

Ing. Robert Knap
VARS BRNO a.s.
Vedoucí oddělení GIS

další řešitelé

Mgr. Pavla Štěpánková, Ph.D.
Mgr. Martin Caletka
Mgr. Radek Bachan
Ing. Radka Klepárníková
Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
Ing. David Duchan, Ph.D.
Ing. Michal Pavlíček
Vysoké učení technické v Brně

Obsah

1 CÍL METODIKY ... 3
2 DIGITALIZACE VSTUPNÍCH PODKLADŮ ... 4
2.1 PRACOVNÍ POSTUP DIGITALIZACE SITUAČNÍCH VÝKRESŮ ... 4
2.2 PRACOVNÍ POSTUP DIGITALIZACE PŘÍČNÝCH PROFILŮ ... 7
3 TVORBA POVRCHŮ DNA ... 12
3.1 PRACOVNÍ POSTUP TVORBY POVRCHU ... 12
3.2 PŘÍKLADY VYUŽITÍ POVRCHŮ V RÁMCI MONITORINGU A ÚDRŽBY ... 15
3.3 PŘÍKLAD VYUŽITÍ POVRCHŮ V RÁMCI 2D NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY ... 16
3.3.1 Prostorová diskretizace náhradní oblasti ... 16
3.3.2 Drsnosti povrchů ... 16
3.3.3 Okrajové a počáteční podmínky ... 17
3.3.4 Zpracování a interpretace výsledků ... 19
4 ROZDÍLOVÁ ANALÝZA ... 22
4.1 PRACOVNÍ POSTUP PROVEDENÍ ROZDÍLOVÉ ANALÝZY ... 22
4.2 PŘÍKLADY VYUŽITÍ ROZDÍLOVÉ ANALÝZY V RÁMCI MONITORINGU A ÚDRŽBY ... 23
5 VÝPOČET OBJEMŮ ... 26
5.1 PRACOVNÍ POSTUP PROVEDENÍ VÝPOČTU OBJEMŮ ... 26
5.2 PŘÍKLADY VYUŽITÍ VÝPOČTŮ OBJEMŮ V RÁMCI MONITORINGU A ÚDRŽBY ... 26
6 ZDŮVODNĚNÍ „NOVOSTI POSTUPŮ“ ... 28
7 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY ... 29
8 EKONOMICKÉ ASPEKTY ... 30
9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY ... 31
10 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE ... 32
11 SEZNAM ZKRATEK ... 33

1 Cíl metodiky

Cílem metodiky je zavedení jednotných postupů pro vyhodnocení dat z měření morfologie dna vodních toků a nádrží vícepaprskovou ultrazvukovou metodou (VUM), popsanou detailně v metodice [1]. Použití této technologie měření je v ČR aktuálně v začátcích a daná oblast není dosud metodicky zpracována. Z těchto důvodů je žádoucí od počátku sjednotit používané postupy pro zpracování naměřených dat, aby byla zajištěna věcná správnost a vzájemná porovnatelnost dat pořízených v různých časových obdobích, na odlišných lokalitách, popř. různými subjekty. Data z měření morfologie dna VUM mohou sloužit jako výchozí podklad v rámci projektové přípravy, realizace a kontroly provedených prací souvisejících s údržbou vodních toků a nádrží. Předkládaná metodika se zaměřuje na následující dílčí činnosti v rámci zpracování dat z měření VUM:

- tvorba povrchů dna (viz kap. 3),
- rozdílová analýza (viz kap. 4),
- výpočty objemů (viz kap. 5).

Pro možnost uceleného řešení dané problematiky byla rovněž zařazena kap. 2, orientovaná na digitalizaci historických analogových podkladů, které jsou nezbytné pro získání informací o referenčním resp. projektovaném stavu morfologie dna. Navržené pracovní postupy jsou zaměřeny na nezřídka se vyskytující případy nestandardních formátů historické výkresové dokumentace.

Součástí metodiky jsou rovněž ilustrativní praktické příklady využití prezentovaných pracovních postupů.

Metodika je určena především správcům vodních toků a nádrží, kteří v rámci svých činností zajišťují plnění definovaných účelů a kapacit koryt a zásobních prostorů vodních nádrží a lze u nich předpokládat nasazení technologie VUM. Konkrétně se jedná o státní podniky Povodí, Lesy ČR, obce ale i soukromé provozovatele, jako jsou energetické společnosti, subjekty podnikající v rybníkářství, projekční a stavební firmy. Obsah metodiky může být přínosný i multioborově např. v souvislosti s ochranou životního prostředí, lodní dopravou apod.

Uvedené subjekty mohou pracovní postupy popsané metodikou využívat přímo, pokud disponují technologií VUM, popř. předpokládají zpracování primárních dat z měření pořízených prostřednictvím subdodavatelů. Druhou uvažovanou možností je využití metodiky pro specifikaci pracovních postupů v rámci zadávacích řízení veřejných zakázek na výběr vhodného dodavatele zpracování výsledků měření VUM.

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. QJ1520267 s názvem „Systém řízení monitoringu a údržby VH infrastruktury“ v rámci programu Komplexní udržitelné systémy v zemědělství "KUS" s dobou řešení v letech 2015 až 2018.

2 Digitalizace vstupních podkladů

Cíl: Doporučení pracovních postupů pro digitalizaci údajů o morfologii dna vodních toků a nádrží na základě nestandardních formátů historické analogové výkresové dokumentace.

Vstupní data: Výkresová dokumentace zahrnující situace a příčné řezy vodních toků a nádrží v analogové (papírové) podobě.

Výstupy: Rastrová data obsahující skenovanou výkresovou dokumentaci a vektorová data zahrnující bodová pole, hrany popř. vrstevnice.

Praktická aplikace výsledků: Výsledky digitalizace vstupních podkladů mají využití v těchto oblastech:

- Archivace digitalizovaných historických podkladů v datovém skladu.
- Vstupní data pro tvorbu povrchů dna vodních útvarů, rozdílové analýzy, výpočty objemů sedimentů a hydraulické modelování (viz kap. 3 až 5).
- Podklad pro tvorbu specializovaných map a další grafické dokumentace (např. podélné a příčné řezy).
- Zdroj dat pro mapové portály a služby.

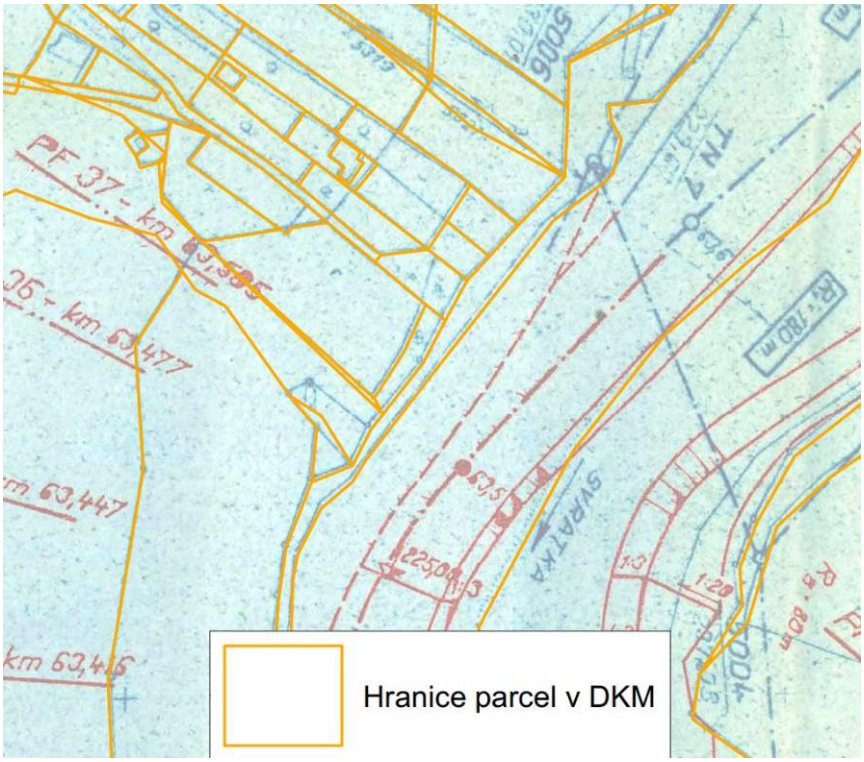
Analogová data ve formě historické výkresové dokumentace tvoří podstatný zdroj informací o referenčním resp. projektovaném stavu morfologie dna vodních toků a nádrží. Při zpracování tohoto typu podkladů se nezřídka vyskytují případy, kdy má dokumentace nestandardní formát nebo je nekompletní. Obvykle se však jedná o jediná dostupná data zachycující historický stav morfologie dna. Z těchto důvodů byly navrženy vhodné pracovní postupy dokumentované v kap. 2.1 a 2.2, které umožňují převedení těchto specifických podkladů do digitálního formátu a jejich další využití v rámci prováděných analýz (viz kap. 3 až 5). Výkresovou dokumentací se v souvislosti s předmětem metodiky rozumí situace a řezy vodních toků a nádrží.

2.1 Pracovní postup digitalizace situačních výkresů

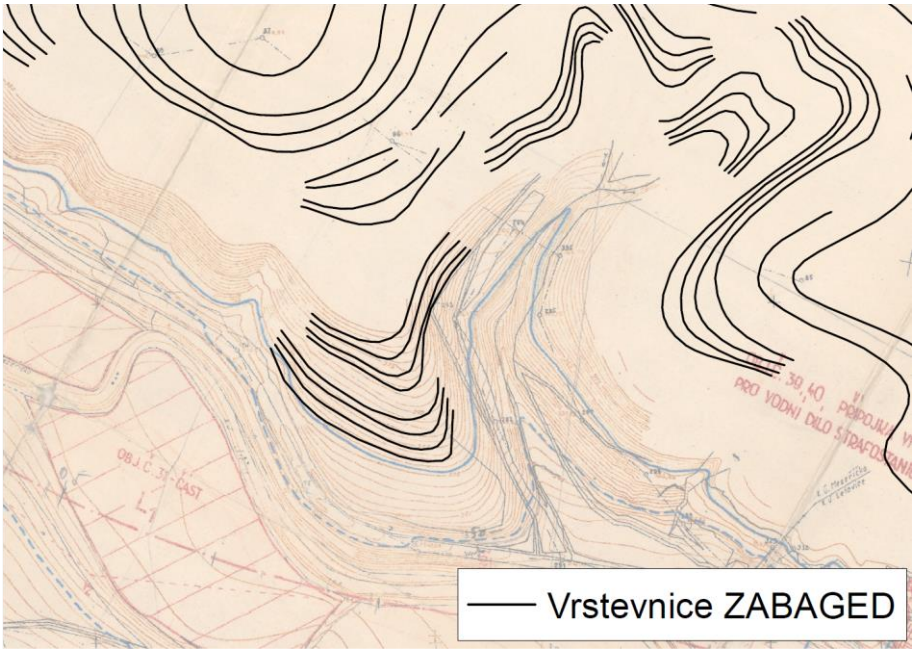
Shromážděné analogové podklady je třeba v první fázi naskenovat a dále georeferencovat v rámci souřadnicového systému S-JTSK. Korektní georeferencování je základním předpokladem k získání relevantních výsledků. V případech, kdy pro účely georeferencování nejsou k dispozici známé body s udanými souřadnicemi (např. z vytyčovacích výkresů) lze využít následující alternativní postupy, které jsou seřazeny sestupně dle dosažitelné přesnosti:

- využití dobře identifikovatelných obrysů objektů zobrazených v situačním výkresu (viz pilíř jezové konstrukce na obrázku 2.1),
- využití hranic původních parcel (obr. 2.2),
- využití výrazných tvarů reliéfu na podkladě vrstevnic (obr. 2.3 a 2.4).

Obr. 2.1 Příklad vhodného vlícovacího bodu sloužícího ke georeferencování situačního výkresu



Obr. 2.2 Georeferencování situačního výkresu s využitím původních hranic parcel a digitální katastrální mapy (DKM)



Obr. 2.3 Georeferencování situačního výkresu založené na výrazných tvarech terénu s využitím vrstevnic

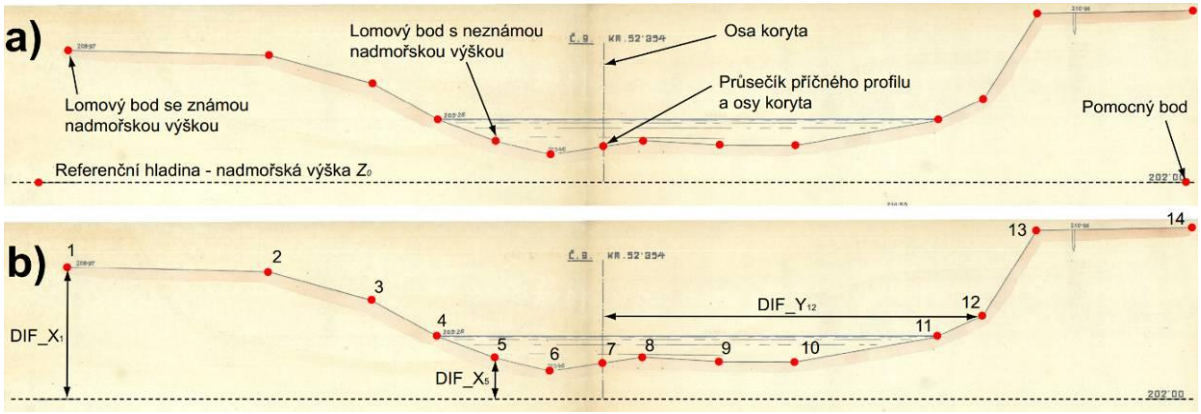
Obr. 2.4 Ukázka vektorizace vrstevnic na podkladu situačního výkresu zátopy vodní nádrže

Dalším krokem, navazujícím na provedené georeferencování situačních výkresů, je vektorizace příčných profilů dle pracovních postupů popsaných v následující kapitole 2.2.

2.2 Pracovní postup digitalizace příčných profilů

Příčné profily jsou ve výkresových dokumentacích zobrazovány jako linie s lomovými body. U těchto bodů je standardně uváděna hodnota nadmořských výšek a staničení v rámci profilu. V praxi se však vyskytují specifické případy, kdy je historická dokumentace příčných řezů nečitelná nebo nekompletní. Příkladem je profil uvedený na obr. 2.5, kde u lomových bodů chybí jak specifikace výškových kót, tak údajů o staničení. V následujících odstavcích je uveden doporučený pracovní postup, který umožňuje digitalizaci obdobně nestandardních příčných řezů.

Skenované výkresy příčných profilů je třeba za účelem stanovení chybějících údajů (nadmořské výšky a vzájemné vzdálenosti lomových bodů) zpracovat GIS nástroji. Prvním krokem je vyrovnání skenovaných výkresů příčných řezů do vodorovné polohy podle průběhu srovnávací roviny. Důležitým předpokladem je, aby oskenovaný obraz nebyl nijak zdeformován. Polohu jednotlivých lomových bodů a pomocných bodů na referenční linii je nutné zakreslit do bodové vektorové vrstvy pojmenované pro další využití PF_BODY.shp. V této mapové vrstvě jsou každému lomovému bodu příčného profilu koryta přiřazeny relativní souřadnice X a Y. Na základě známých nadmořských výšek, známých vzájemných vzdáleností a rozdílů jejich relativních souřadnic (DIF_X, DIF_Y) je možné dopočítat chybějící údaje (obr. 2.5b). Atributová tabulka mapové vrstvy PF_BODY.shp vrstvy obsahuje pole uvedená v tabulce 2.1.



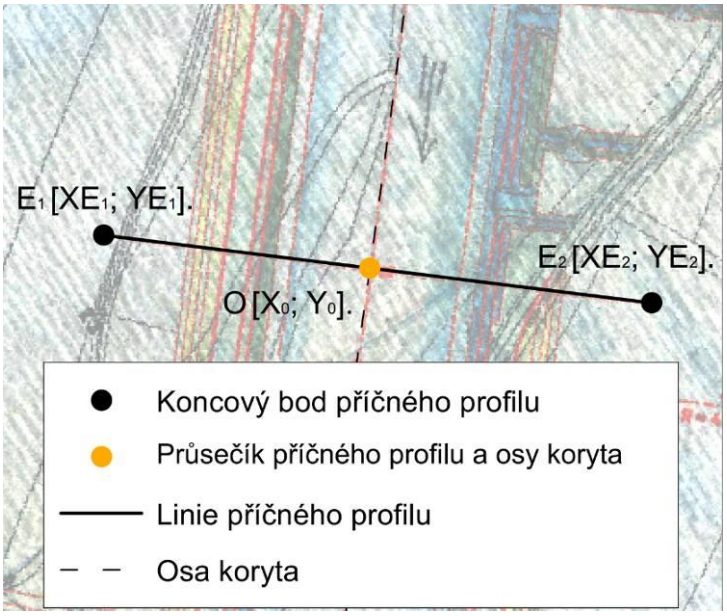
Obr. 2.5 Postup stanovení nadmořské výšky a vzdálenosti lomových bodů příčného profilu od osy toku; a) zakreslení lomových bodů příčného profilu a referenční hladiny; b) odvození nadmořských chybějících údajů o nadmořské výšce a vzájemných vzdálenostech na základě relativních souřadnic bodů.

Tab. 2.1 Přehled atributů vrstvy vektorizovaných lomových bodů příčných profilů (PF_BODY.shp.)

Název pole	Formát dat	Popis
PP_ID	Text	identifikátor příčného profilu ve formátu "PP_01" nebo PF01“ apod.
BOD_ID	Text	identifikátor bodu příčného profilu, údaj ve formátu "01", "02" atd., u pomocných bodů "00"
DIF_X	Double	rozdíl relativní souřadnice lomového bodu a počátečního bodu v horizontálním směru odpovídající jeho vzdálenosti od tohoto počátečního bodu
DIF_Y	Double	rozdíl relativní souřadnice lomového bodu a pomocného bodu na referenční hladině ve vertikálním směru odpovídající rozdílu jejich nadmořských výšek
DIF_Z	Double	rozdíl nadmořské výšky lomového bodu vůči referenční hladině
M	Double	měřítko charakterizující zmenšení/zvětšení výkresu
POINT_X	Double	kartografická souřadnice X bodu určující jeho skutečnou polohu v rámci daného souřadného systému
POINT_Y	Double	kartografická souřadnice Y bodu určující jeho skutečnou polohu v rámci daného souřadného systému
PORADI	Text	pořadí bodu v rámci příslušného příčného profilu, údaj ve formátu "01", "02" atd., u pomocných bodů "00"
POZNAMKA	Text	obsahuje doplňující informace - např. jestli se jedná o počáteční bod, bod ležící na referenční hladině, zda je přítomno opevnění apod.
STRANA	Text	vyjadřuje, na které straně od počátečního bodu daný lomový bod lepší ("L" - vlevo, "P" - vpravo)
Z	Float	nadmořská výška daného lomového bodu příčného profilu odečtená přímo z technického výkresu, nebo odvozená výpočtem
VZDALENOST	Float	vodorovná vzdálenost (staničení) daného lomového bodu od počátečního bodu

Pozn.: Formát dat Double a Float jsou formáty odpovídající reálným číslům.

Výpočet kartografických souřadnic jednotlivých bodů příčných profilů spočívá v lokalizování jednotlivých bodů na liniích příčných profilů v georeferencovaném situačním výkresu. Linie příčných profilů je třeba překreslit do mapové vrstvy pojmenované pro další využití PF_PROFILY.shp. Do mapové vrstvy pojmenované OSA.shp je dále zakreslena linie osy, pokud je v situačním výkresu vyznačena. Průsečíky linií příčných profilů a osy, které je nutné zakreslit do bodové mapové vrstvy INTS.shp, slouží následně jako referenční body (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6 Příčné profily definované koncovými body a průsečíky s osou toku

Linie jednotlivých příčných profilů leží na přímkách definovaných kartografickými souřadnicemi jejich koncových bodů. Dvojice koncových bodů $E_1[XE_1; YE_1]$, $E_2[XE_2; YE_2]$ příčného profilu (obr. 2.6) určuje směrový vektor přímky $\vec{u}(u_1, u_2)$, na níž daný příčných profil leží. Souřadnice směrového vektoru se stanoví ze vztahů:

$$u_1 = (XE_1 - XE_2), \tag{2.1}$$

$$u_2 = (YE_1 - YE_2). \tag{2.2}$$

Ze směrového vektoru je dále odvozen normálový vektor $\vec{n}(n_1, n_2)$ přímky p, která odpovídá linii příčného profilu. Pro souřadnice normálového vektoru platí:

$$n_1 = u_2, \tag{2.3}$$

$$n_2 = -u_1. \tag{2.4}$$

Obecná rovnice přímky p, na níž příčný profil leží, má tvar:

$$p: n_1 X + n_2 Y + c = 0, \tag{2.5}$$

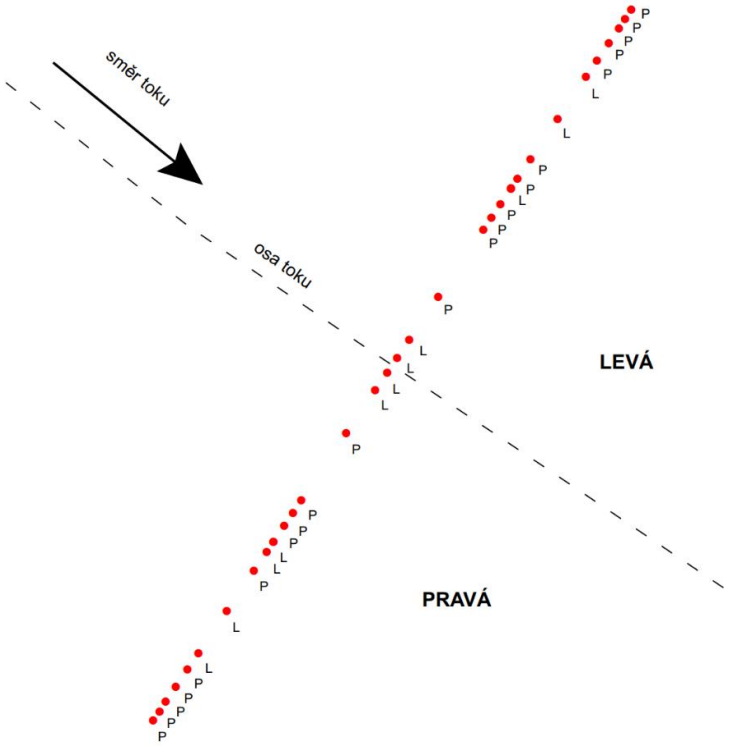
kde n_1, n_2 jsou souřadnice normálového vektoru $\vec{n}$, X a Y jsou kartografické souřadnice libovolného bodu ležícího na přímce a c je konstanta dané přímky.

Je-li pro každý lomový bod příčného profilu známa jeho vzdálenost d od referenčního bodu a jsou-li známy jeho kartografické souřadnice $[X_0; Y_0]$, je možné sestavit soustavu dvou rovnic o dvou neznámých X_i, Y_i (tj. hledané kartografické souřadnice konkrétního bodu) ve tvaru:

$$0 = n_1 X_i + n_2 Y_i + c, \tag{2.6}$$

$$d = \sqrt{(X_i - X_o)^2 + (Y_i - Y_o)^2}. \quad (2.7)$$

Řešení uvedené soustavy vede na kvadratickou rovnici, jejíž diskriminant splňuje podmínku $D > 0$, a tudíž má dvě řešení. Jedná se o dva body se souřadnicemi $B_{i1}[X_{i1}; Y_{i1}]$,$B_{i2}[X_{i2}; Y_{i2}]$, ležící ve stejné vzdálenosti od osy toku na příčném profilu. Pro identifikaci správného bodu, který leží na správné straně toku, je využit obsah atributu STRANA v mapové vrstvě s body příčných profilů (PP_body.shp). Ten definuje polohu bodu na pravé či levé straně (hodnota atributu „P“ či „L“) od osy toku. Výběr je prováděn za pomoci dvou polygonů pokrývajících dostatečně široký prostor v okolí toku. Tyto polygony se dotýkají hranicemi, které kopírují osu toku (obr. 2.7). Hledané body leží v polygonu se stejným označením strany, jako obsahuje atribut bodu STRANA. Body s atributem STRANA „P“ ležícím v polygonu s označením PRAVÁ strana a Body s atributem STRANA „L“ ležícím v polygonu s označením LEVÁ strana jsou hledaným řešení. Body s rozdílným označením stran je nezbytné z mapové vrstvy bodů příčných profilů odstranit.

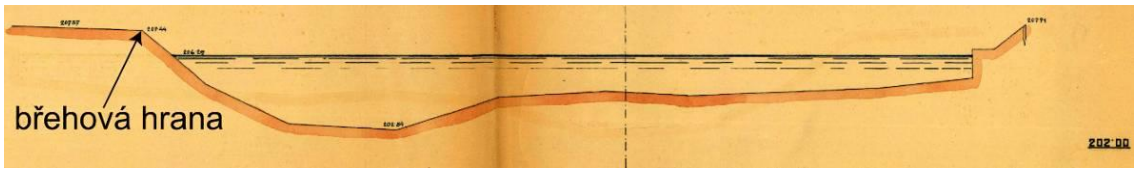


Obr. 2.7 Rozložení vypočtených bodů vzhledem k jejich příslušnosti k pravé či levé straně vůči ose toku (O - průsečík s osou toku)

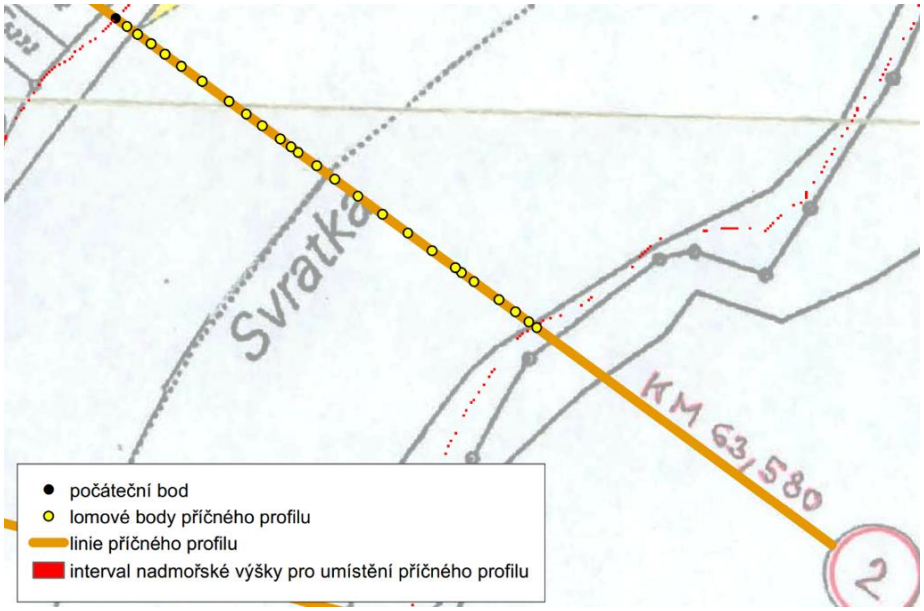
V praxi se rovněž vyskytují případy, kdy situační výkresy neobsahují prvky umožňující přesnou lokalizaci příčných profilů a není tak možné určit polohu referenčního bodu, od kterého je následně odvozena přesná poloha jednotlivých lomových bodů na linii příčného profilu. Uvedený problém lze řešit následujícími postupy:

- lokalizace profilu podle břehové hrany,
- lokalizace profilu podle batygrafie koryta.

V případě lokalizace dle břehové hrany se uvažuje jako referenční bod břehová hrana profilu. Nadmořskou výšku referenčního bodu na břehové hraně je třeba získat vhodnou geodetickou měřící metodou (tachymetrie, laserové skenování, apod.).



Obr. 2.8 Odečtení nadmořské výšky břehové hrany z výkresu příčného profilu



Obr. 2.9 Stanovení počátečního bodu a následné umístění lomových bodů příčného profilu podle rastru DMR 5G

Pokud je prováděna lokalizace podle batygrafie koryta, liší se přístup pouze v tom, že namísto břehové hrany je poloha příčného profilu určována z celkového posouzení tvaru dna podél linie příčného profilu. K tomuto účelu lze využít např. zaměření dna VUM. Během dlouhého období však dochází k přirozeným i antropogenně akcelerovaným morfologickým změnám, které mohou využití obou posledně jmenovaných metod znesnadnit či znemožnit.

Data získaná digitalizací analogových podkladů je nezbytné společně s metadaty uložit v datovém skladu tak, aby byla dostupná pro další možné zpracování. Tato data reprezentují referenční stav vodního útvaru a vstupují do následujících analýz (viz kap. 3 až 5) jako důležitý podklad pro jejich realizaci.

3 Tvorba povrchů dna

Cíl: Doporučení pracovních postupů pro tvorbu povrchů reprezentujících dno koryta toku nebo nádrže na základě dat z měření vícepaprskovou ultrazvukovou metodou (VUM) [1].

Vstupní data: Vektorová data zahrnující bodová pole resp. mračna bodů získaná měřeními VUM v souladu s [1], popř. další zdroje bodových dat (např. tachymetrická měření, laserové skenování povrchu, digitalizace analogových podkladů apod.).

Výstupy: Spojité povrchy ve formátu TIN, zahrnující výškopisné údaje o morfologii dna toku nebo nádrže.

Praktická aplikace výsledků: Výsledky tvorby povrchů dna mají využití v těchto oblastech:

- Archivace spojitých údajů o morfologii dna toku nebo nádrže v datovém skladu.
- Vstupní data pro rozdílové analýzy a výpočty objemů sedimentů (viz kap. 4 a 5).
- Vstupní data pro hydraulické výpočty proudění vody v tocích resp. záplavových územích metodami dvojdimenzionálního (2D) numerického modelování (viz kap. 3.3). V souvislosti s předmětem metodiky se předpokládá využití těchto nástrojů k posouzení vlivu změn morfologie dna na průtočné poměry v zájmové oblasti. Konkrétně se jedná např. o tyto praktické aplikace:
  - hodnocení změn kapacity koryta a souvisejících objektů v souvislosti s řešením povodňové ochrany,
  - hodnocení průtočných poměrů v korytě toku pro účely lodní dopravy, využití vodní energie apod.
- Podklad pro tvorbu specializovaných map morfologie dna vodních útvarů a další grafické dokumentace (např. podélné a příčné řezy).
- Zdroj dat pro mapové portály a služby.

Pojmem povrch je v dalším textu označován tzv. digitální model terénu (DMT), který představuje digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače. DMT je složen z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů [5]. Pro tvorbu povrchů je aktuálně k dispozici značné množství interpolačních metod, které se liší uživatelskou náročností, požadavky na vstupní data a dosahovanými výsledky. Z těchto důvodů je účelné zavedení jednotného pracovního postupu (viz kap. 3.1), který zajistí věcnou správnost a porovnatelnost dat z měření VUM realizovaných v různých časových obdobích, na odlišných lokalitách, popř. různými subjekty.

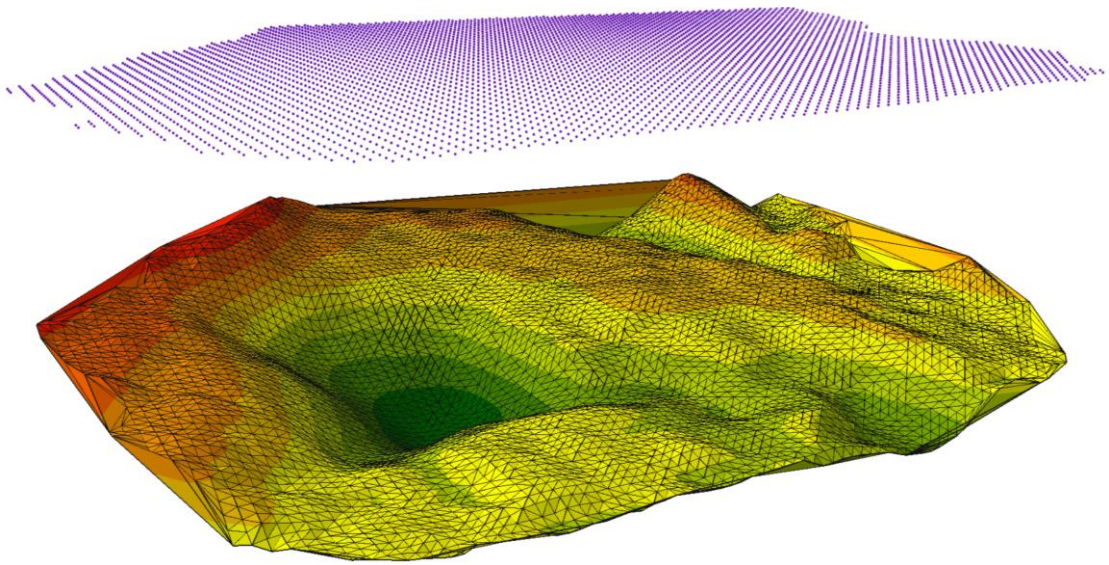
3.1 Pracovní postup tvorby povrchu

K vytvoření povrchu dna na základě měření VUM je doporučena metoda lineární interpolace, která umožňuje využití vstupních dat ve formě bodů, linií a polygonů. Výstupem metody je prostorová nepravidelná trojúhelníková síť, tzv. TIN (viz obr. 3.1). Zásadní vlastností této interpolační metody a důvodem jejího výběru je skutečnost, že TIN striktně prochází všemi naměřenými body. V případě použití této metody nevznikají odchylky mezi hodnotou interpolovaného povrchu a měřením. Další

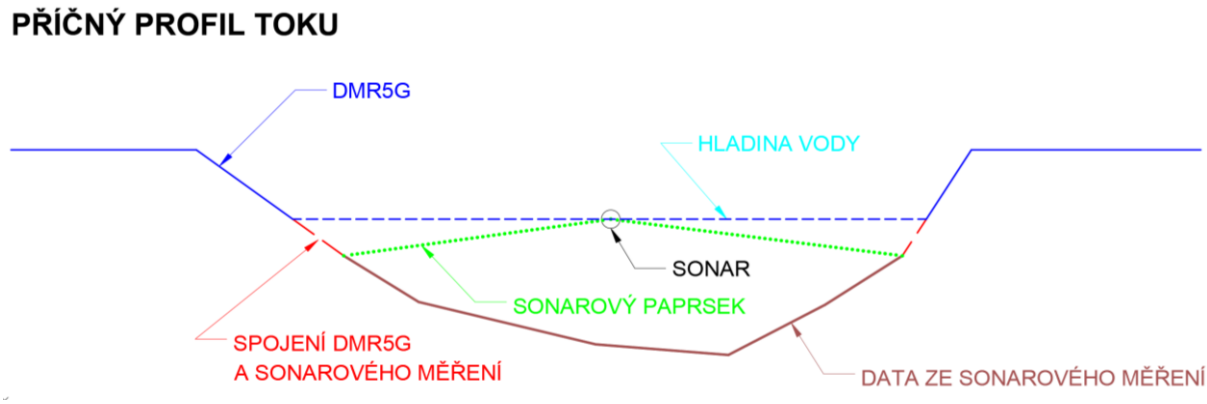
výhodou této metody je její relativní jednoduchost ve smyslu interpretace výsledků, dostupnost ve většině GIS nástrojů a specializovaných programů pro práci s DMT. Vytvořený TIN je možno editovat resp. kombinovat s dalšími zdroji dat pořízenými odlišnými metodami měření (např. zaměření morfologie koryta toku VUM pod hladinou vody a data z laserového skenování povrchu zachycující morfologii terénu přilehlého území nad hladinou vody). Obvyklé kombinace spojovaných dat jsou uvedeny na Obr. 3.2 až 3.4.

Konkrétní postup vytvoření povrchu dna ve formě TIN probíhá v následujících krocích:

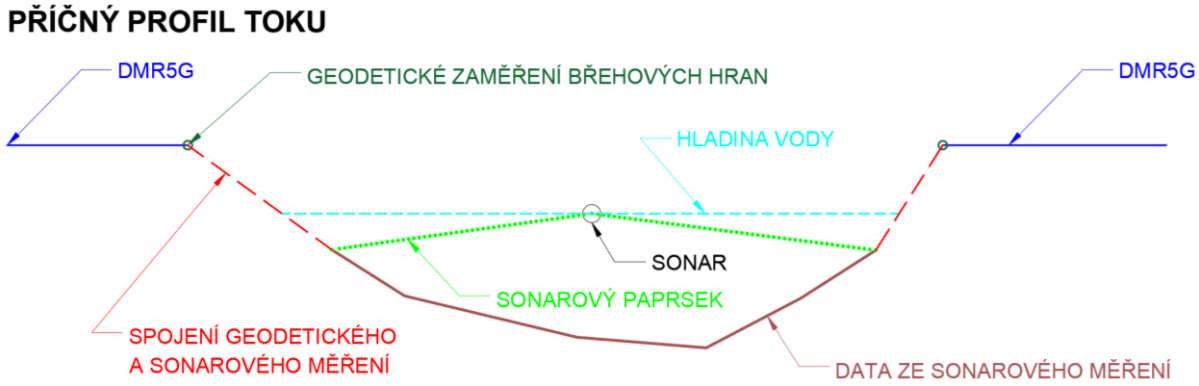
1. Zajištění vhodného programového vybavení (např. ArcGIS, Autodesk Civil 3D, Atlas DMT apod.).
2. Zajištění primárních vstupních dat z měření dna VUM ve formě mračen bodů popř. přilehlého záplavového území ve formě vektorových dat (body, hrany) resp. mračen bodů. Zvolený formát musí odpovídat použitému programovému vybavení.
3. Import vstupních dat a jejich vizuální kontrola z hlediska prostorového umístění a hodnot nadmořských výšek. Rozsah udávaných nadmořských výšek je možné orientačně ověřit s použitím statistických metod.
4. V případě vzájemného prostorového překryvu jednotlivých datových vrstev následuje odstranění duplicitních dat nebo dat s předpokládanou nižší přesností.
5. Vygenerování TIN s následnou vizuální kontrolou výstupů. Předmětem kontroly jsou především hodnoty TIN v místě měřených bodů popř. hran.
6. Archivace primárních vstupních dat, vytvořené sítě TIN a metadat. Vytvořený TIN ukládáme jednak v původním formátu odpovídajícímu použitému programovému vybavení a dále jako prostorovou (3D) síť v "univerzálním" vektorovém formátu (např. ESRI shapefile nebo *.dxf).



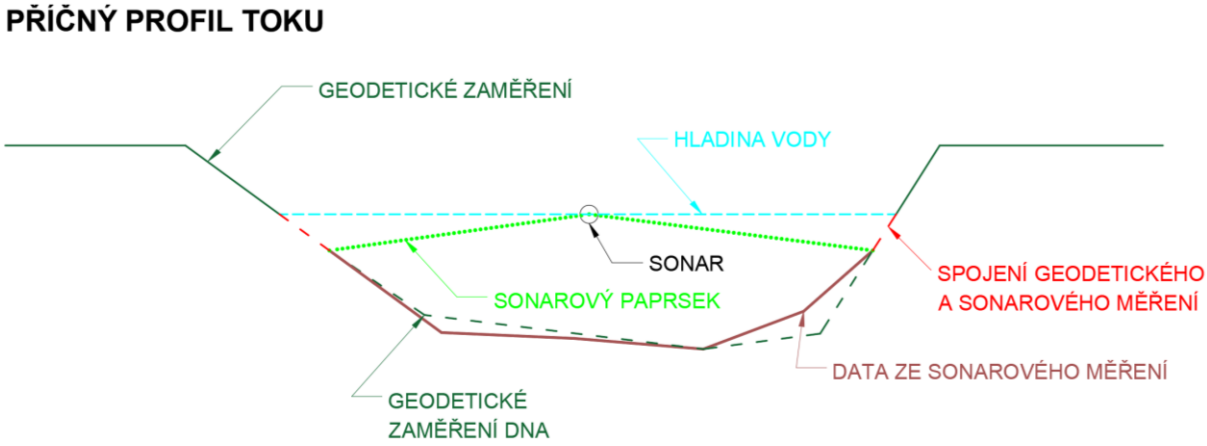
Obr. 3.1 TIN vytvořený z mračna bodů



Obr. 3.2 Kombinace DMR5G a interpolovaného povrchu z měření VUM (sonarové měření)



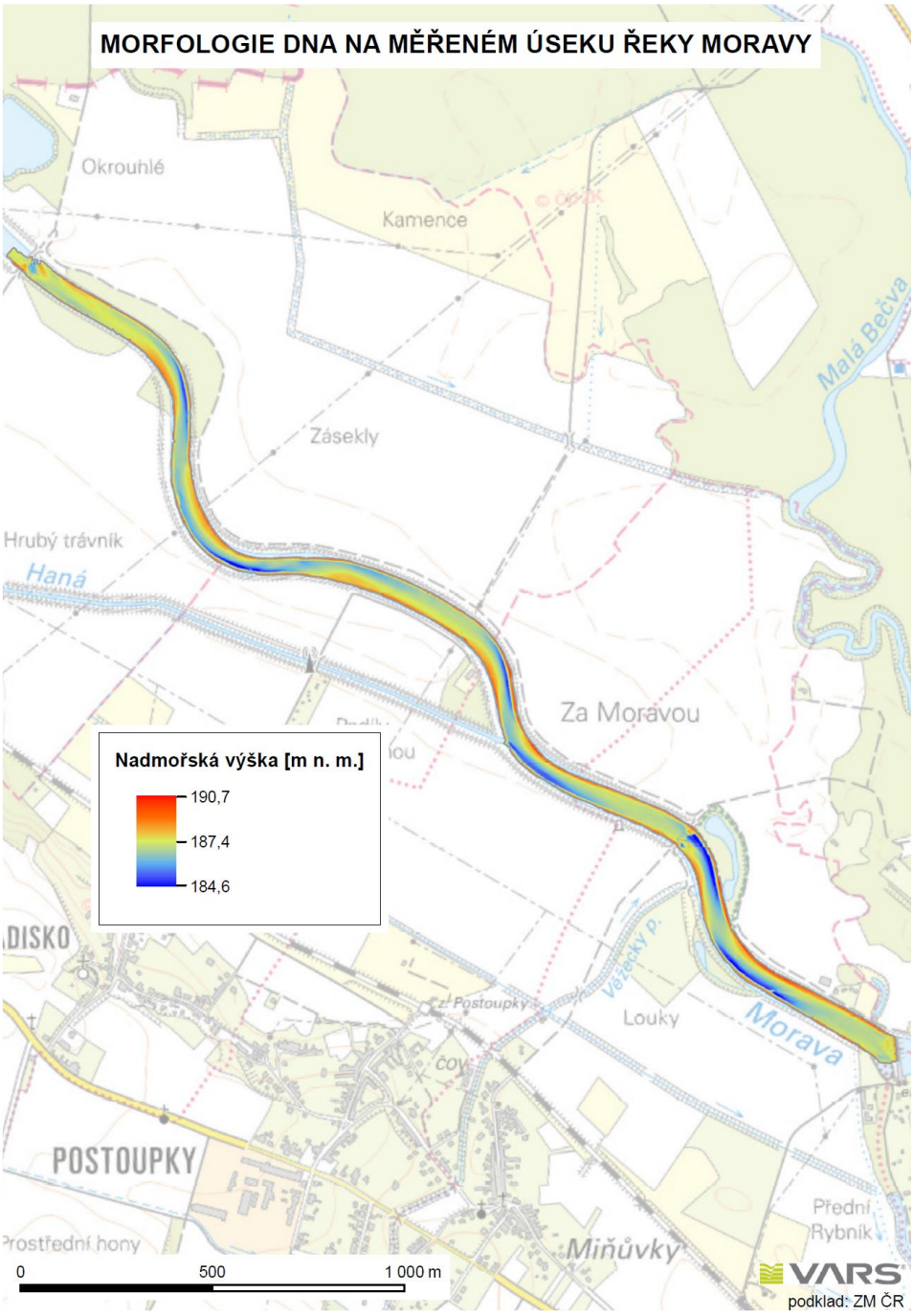
Obr. 3.3 Kombinace DMR5G, pozemního geodetického měření a interpolovaného povrchu z měření VUM (sonarové měření)



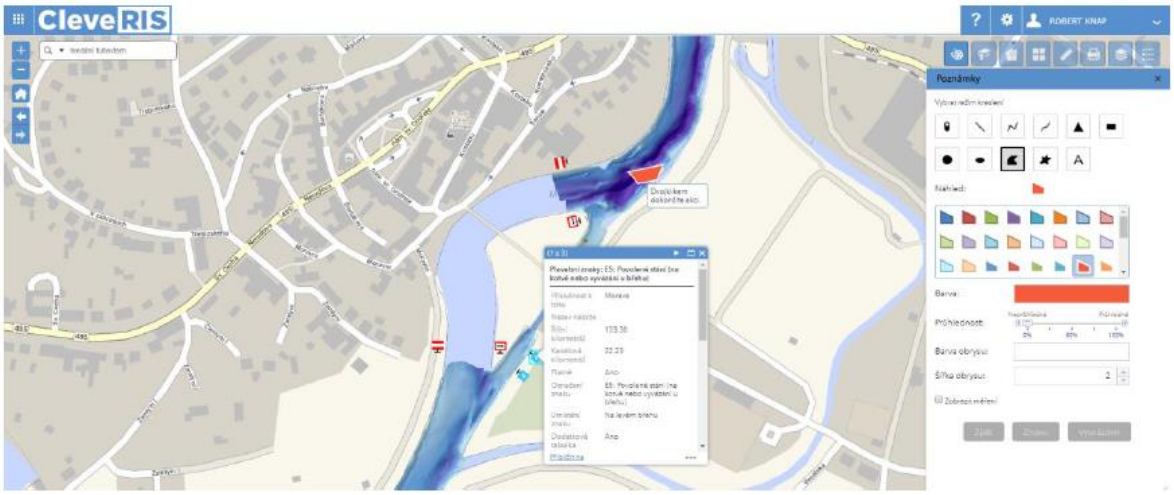
Obr. 3.4 Kombinace pozemního geodetického měření a interpolovaného povrchu z měření VUM (sonarové měření)

3.2 Příklady využití povrchů v rámci monitoringu a údržby

Povrchy dokumentují stav morfologie dna odpovídající času pořízení vstupních dat a poskytují spojitou informaci o nadmořských výškách dna. Archivace se provádí v digitální podobě do datového skladu, kde se ukládají jak samotné datové vrstvy, tak metadata obsahující např. časové údaje o zpracování, použité metody, identifikaci zpracovatele apod. Vhodně zvolené zobrazovací metody umožňují znázornit povrch dna vodního útvaru v mapové aplikaci (obr. 3.6) nebo pomocí specializované mapy (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Příklad specializované mapy zobrazující interpolovaný povrch dna z měření VUM



Obr. 3.6 Příklad zobrazení interpolovaného povrchu dna z měření VUM v mapové webové aplikaci

V případě, že jsou k dispozici povrchy reprezentující morfologii dna v různých časových obdobích, lze provést hodnocení jeho časového vývoje metodami rozdílové analýzy (viz kap. 4) nebo s využitím výpočtů objemů (viz kap. 5). Obdobně je možné posoudit případný vliv změny morfologie dna koryta na průtočné poměry v toku nástroji hydrodynamického modelování (viz kap. 3.3).

3.3 Příklad využití povrchů v rámci 2D numerického modelování proudění vody

Příklad ilustruje sestavení 2D numerického modelu pro posouzení kapacity koryta toku Morava v km 182,870 až 186,210 vlivem změny morfologie dna s využitím dat z měření VUM. Úloha byla řešena za předpokladu ustáleného nerovnoměrného proudění vody. v programu BASEMENT.

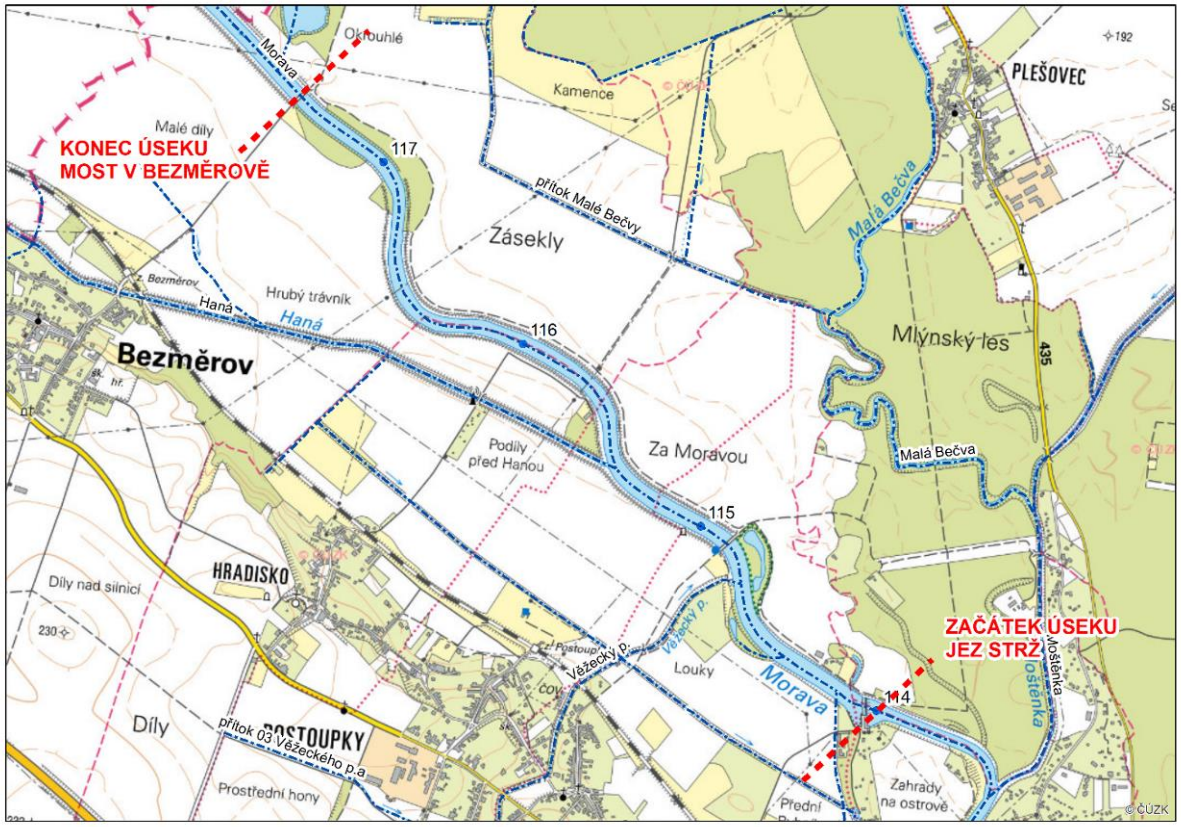
3.3.1 Prostorová diskretizace náhradní oblasti

V rámci řešené lokality byla použita data z měření dna koryta Moravy v km 182,870 až 186,210 (obr. 3.7) metodou VUM, přičemž povrch dna byl vytvořen z mračna bodů pomocí lineární interpolace TIN. Břehy nad hladinou vody byly zaměřeny pomocí bodového měření GPS/GNSS přístroji. Spojení povrchu dna koryta z měření VUM a měření pomocí GPS/GNSS bylo provedeno v programu Autodesk Civil 3D.

Pro danou lokalitu byla vytvořena 2D náhradní oblast, která pokrývala koryto toku ohraničené břehovými liniemi. Prostorová diskretizace náhradní oblasti byla provedena s použitím nepravidelné trojúhelníkové sítě. Detail vytvořené výpočtové sítě je patrný z obrázků 3.9 a 3.10.

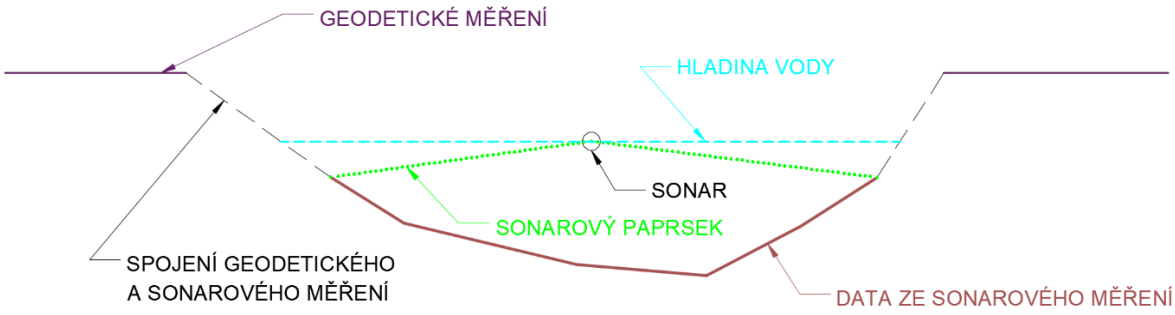
3.3.2 Drsnosti povrchů

Hodnota součinitele drsnosti dle Manninga byla v programu BASEMENT zadána hodnotou n = 0,035 pro celou oblast koryta toku.



Obr. 3.7 Situace řešené oblasti toku Moravy v km 182,870 až 186,210

PŘÍČNÝ PROFIL TOKU



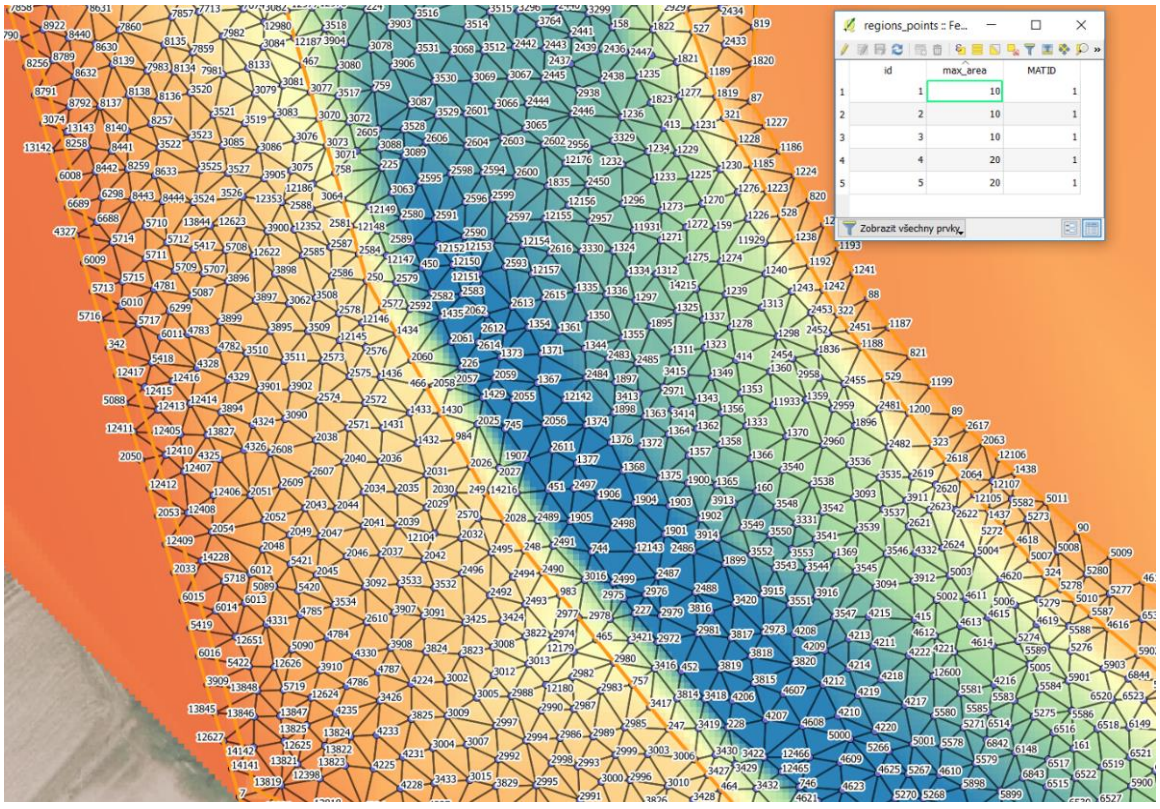
Obr. 3.8 Schéma napojení dat z měření VUM (sonarové měření) a geodetického zaměření břehových hran metodou GPS/GNSS

3.3.3 Okrajové a počáteční podmínky

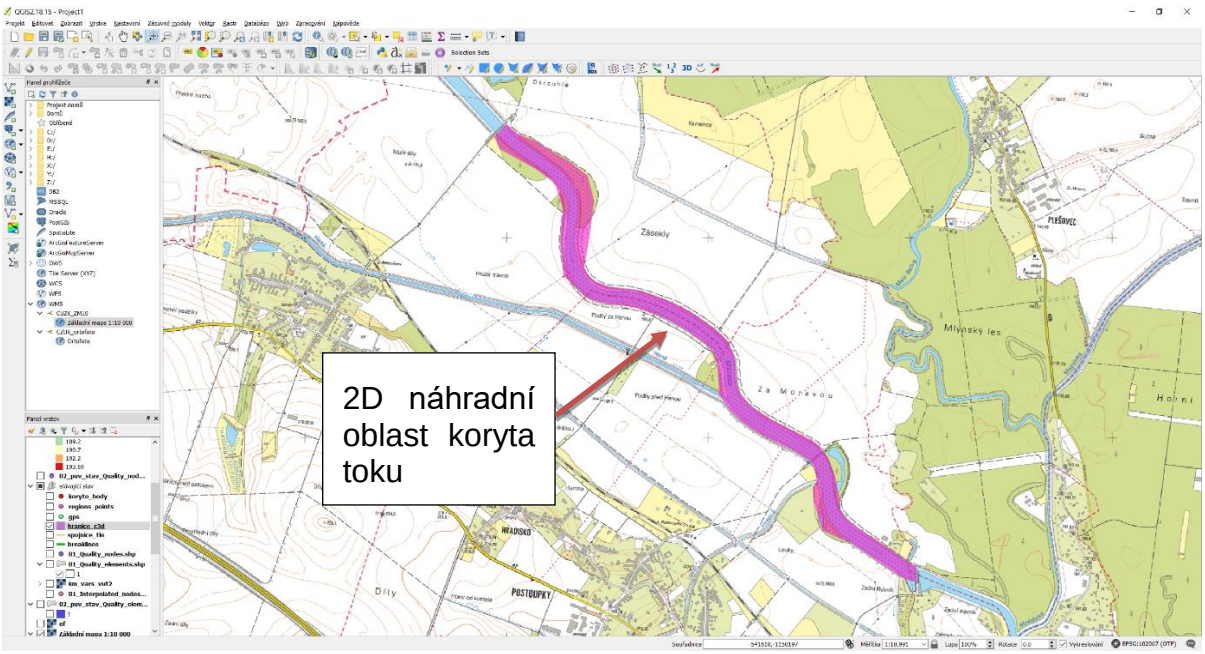
V rámci řešeného úseku Moravy byly okrajové podmínky zadány následovně (viz obr. 3.12):

- V horní části toku byla zadána okrajová podmínka hodnotou průtoku Q = 331,9 m^3/s.
- V dolní části toku v místě jezu byla zadána okrajová podmínka kótou úrovně hladiny H = 190,76 m n. m.

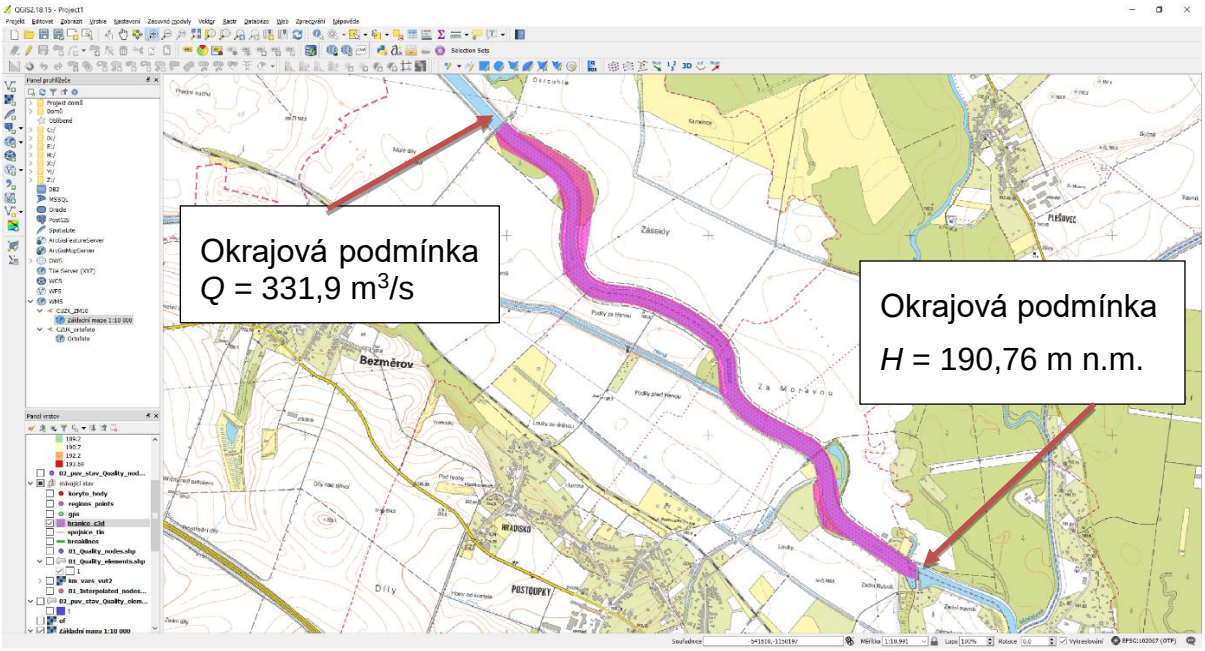
Obr. 3.9 Detail výpočtové sítě podložený ortofotomapou



Obr. 3.10 Detail výpočtové sítě podložený povrchem koryta toku.



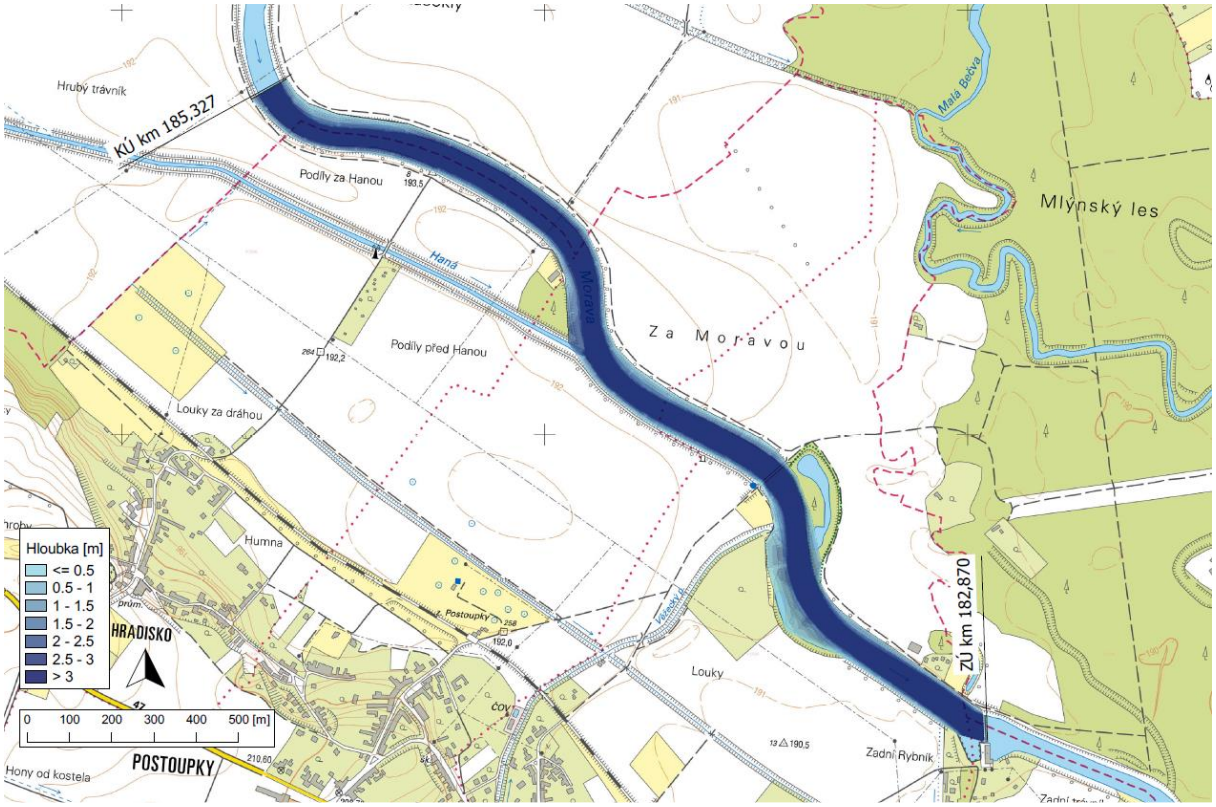
Obr. 3.11 2D náhradní oblast v programu QGIS



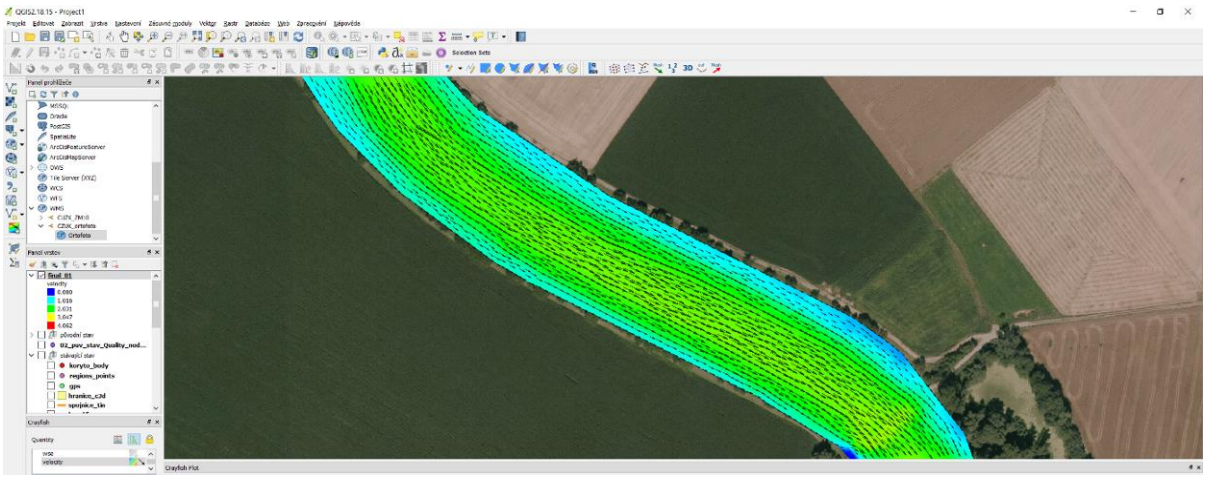
Obr. 3.12 Okrajové podmínky řešené lokality

3.3.4 Zpracování a interpretace výsledků

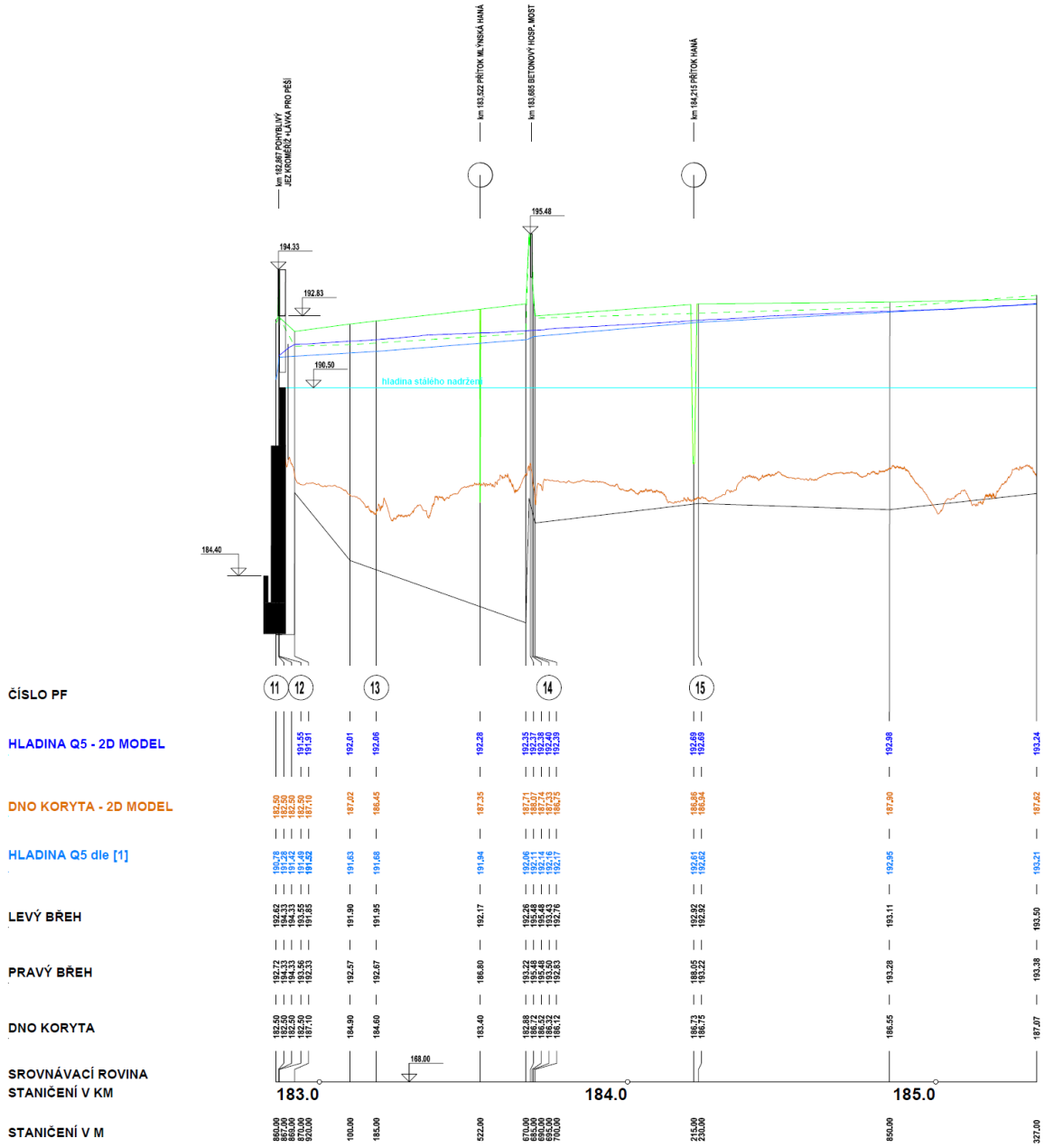
Výsledky výpočtů byly zpracovány pomocí programu QGIS s nadstavbou CRAYFISH do podoby specializovaných map s odborným obsahem zachycujících vypočtené úrovně hladin vody, hloubek (viz obr. 3.13) a rychlostí proudění vody (viz obr. 3.14). Dále byl vytvořen podélný profil zájmového úseku toku s vyznačením průběhů vypočtených hladin.



Obr. 3.13 Příklad specializované mapy s vypočtenými hloubkami vody - lokalita Kroměříž



Obr. 3.14 Detail rychlostního pole proudění vody při $Q_1 = 331,9\ m^3/s$ - lokalita Kroměříž



Obr. 3.15 Příklad zpracování výsledků výpočtů formou podélného profilu - lokalita Kroměříž

4 Rozdílová analýza

Cíl: Doporučení pracovních postupů pro srovnávání výškových úrovní dna získaných na základě měření VUM nebo digitalizace analogových podkladů. Porovnání lze provést v diskrétních bodech nebo v rámci spojitých povrchů.

Vstupní data: Povrch dna toku nebo nádrže ve formátu TIN (viz kap. 3), bodová měření morfologie dna (např. kontrolní měření s použitím odlišné metody nebo údaje z digitalizovaných historických podkladů).

Výstupy: Diskrétní (bodová vektorová data) nebo spojitá data (povrchy ve formátu TIN) dokumentující zjištěné odchylky srovnávaných úrovní dna.

Praktická aplikace výsledků: Výsledky rozdílové analýzy mají využití v těchto oblastech:

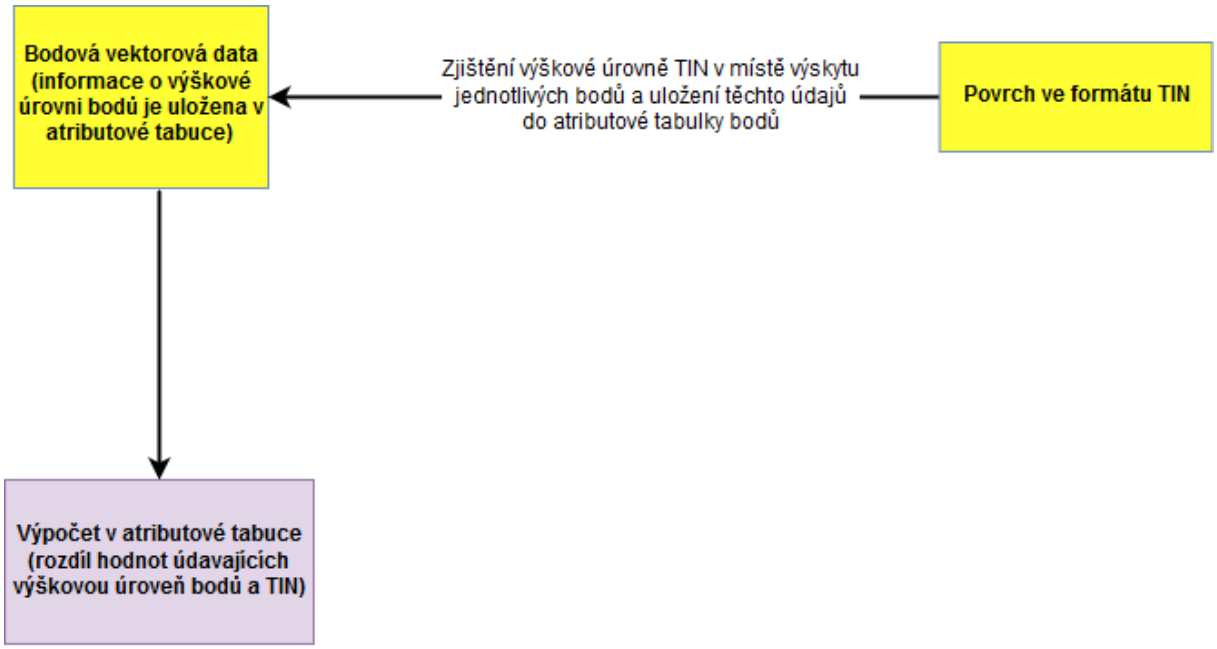
- Archivace výsledků analýz v datovém skladu.
- Podklad pro tvorbu specializovaných map a další grafické dokumentace (např. podélné a příčné řezy).
- Podklad pro plánování údržby toků a nádrží související s těžbou sedimentů.
- Zdroj dat pro mapové portály a služby.

Navržený pracovní postup umožňuje provedení prostorové analýzy, jejímž výsledkem je vzájemné srovnání výškových úrovní povrchů dna. Jako vstupní data slouží dvojice vrstev ve formátu TIN (viz obr. 4.2) nebo kombinace vrstvy ve formátu TIN a bodové vektorové vrstvy (viz obr. 4.1).

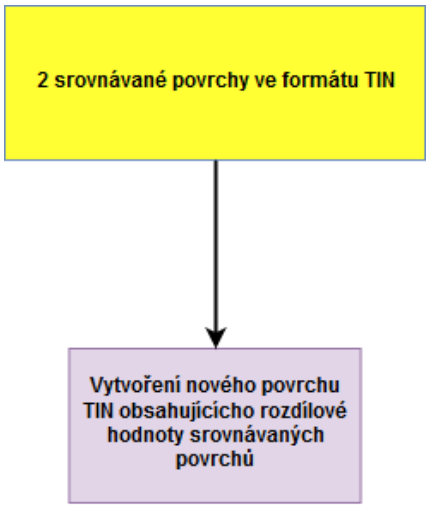
4.1 Pracovní postup provedení rozdílové analýzy

Konkrétní postup realizace rozdílové analýzy probíhá v následujících krocích:

1. Zajištění vhodného programového vybavení (např. ArcGIS, Autodesk Civil 3D, Atlas DMT apod.).
2. Import vstupních dat o morfologii dna (bodová vektorová data nebo spojité povrchy ve formátu TIN), vizuální kontrola prostorového a výškového rozsahu dat. Rozsah udávaných nadmořských výšek je možné orientačně ověřit s použitím statistických metod.
3. Provedení rozdílové analýzy s použitím příslušných nástrojů dle schémat na obr. 4.1 a 4.2. Postup se liší dle zvolené kombinace srovnávaných dat.
4. Kontrola vypočtených rozdílů v náhodně zvolených bodech.
5. Archivace výstupů rozdílové analýzy (bodová data nebo spojité povrchy ve formátu TIN) a metadat. Vytvořený TIN ukládáme jednak ve formátu odpovídajícímu použitému programovému vybavení a dále v "univerzálním" vektorovém formátu (např. ESRI shapefile nebo *.dxf). Bodová vektorová data se ukládají ve formátu ESRI shapefile.



Obr. 4.1 Schéma postupu rozdílové analýzy pro kombinaci vrstvy bodových dat a povrchu TIN



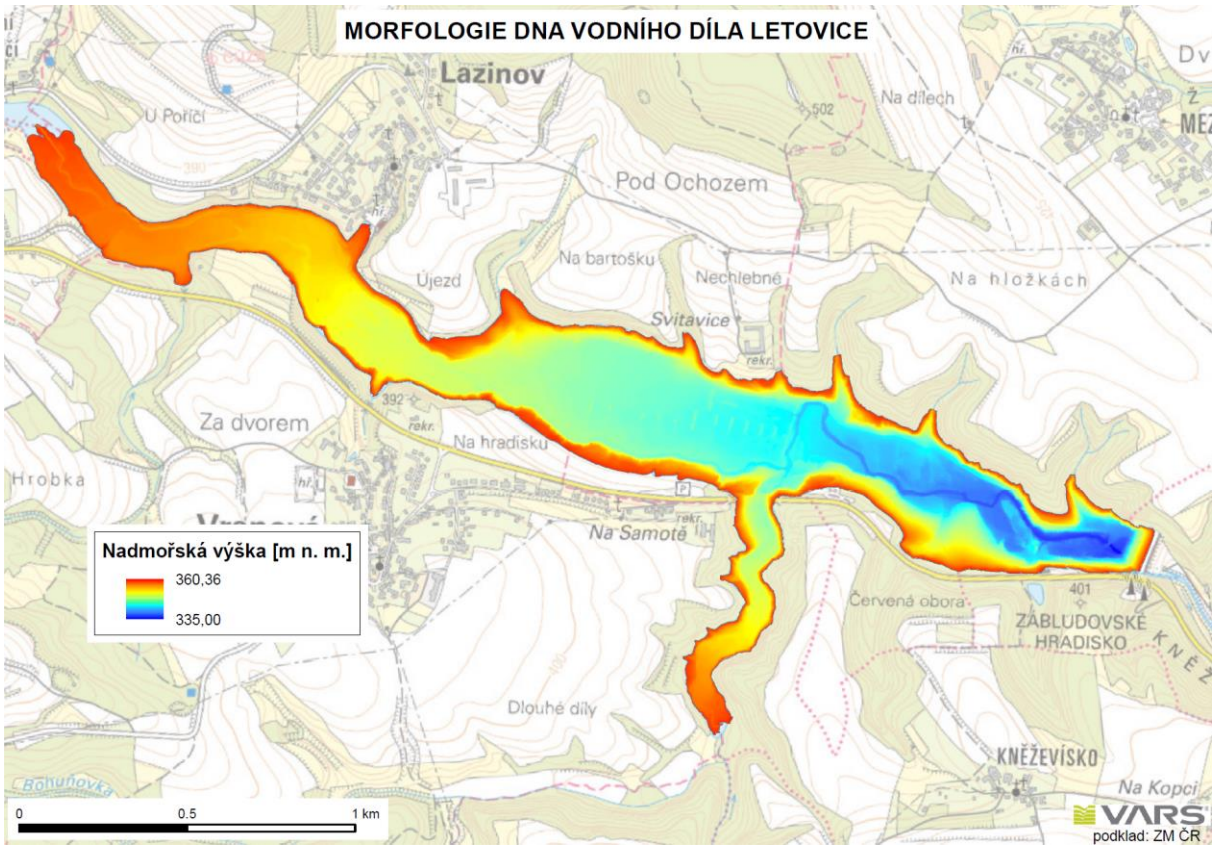
Obr. 4.2 Schéma postupu rozdílové analýzy pro kombinaci dvou povrchů TIN

4.2 Příklady využití rozdílové analýzy v rámci monitoringu a údržby

Metody rozdílové analýzy slouží primárně ke vzájemnému porovnávání údajů o morfologii dna (diskrétní nebo spojitá) z různých časových období nebo např. vycházejících z odlišných metod měření. Na základě těchto dat lze prostým rozdílem hodnot získat údaje o časovém vývoji morfologie dna. Příklad tohoto typu hodnocení pro kombinaci diskrétních a spojitých dat lze nalézt na obrázku 4.3 a 4.4. Výsledek rozdílového hodnocení pro vybrané body je pak doložen v tabulce 4.1.

Další frekventovanou možností využití rozdílových analýz je výpočet hloubek vody v zájmové oblasti na základě údajů o výškových úrovních hladiny a dna (obr. 4.4).

Obr. 4.3 Příklad diskrétních bodových dat udávajících výškové kóty dna a označení tachymetricky zaměřených bodů na VN Letovice



Obr. 4.4 Příklad spojitých dat udávajících výškové kóty dna na VN Letovice - povrch dna vytvořený měřením VUM

Tab. 4.1 Příklad výsledků provedené rozdílové analýzy pro data získaná měřením VUM a tachymetrickým zaměřením (viz obr. 4.3 a 4.4)

Označení bodu	***Spojitá data*** Z_{VUM}	***Diskrétní data*** $Z_{tachymetrie}$	ΔZ
[-]	**[m n. m.]**	**[m n. m.]**	**[m]**
V1	356,652	356,700	-0,048
V2	359,007	358,920	0,087
V3	358,975	358,890	0,085
V4	358,817	358,760	0,057
V5	358,137	358,190	-0,053

5 Výpočet objemů

Cíl: Doporučení pracovního postupu pro výpočet objemů vymezených povrchy dna v různých výškových úrovních resp. povrchem dna a hladinou.

Vstupní data: Povrchy dna toku nebo nádrže ve formátu TIN (viz kap. 3).

Výstupy: Popisné údaje o zjištěných objemech mezi srovnávanými povrchy.

Praktická aplikace výsledků: Výsledky výpočtů objemů mají využití v těchto oblastech:

- Archivace výsledků výpočtů v datovém skladu.
- Podklad pro plánování údržby toků a nádrží související s těžbou sedimentů.
- Podklad pro hodnocení objemů prostorů v nádržích.

Navržený pracovní postup je určen pro výpočty objemů, které jsou vymezeny dvěma nad sebou umístěných povrchy dna resp. povrchem dna a povrchem hladiny. Obecný princip metody výpočtu objemu pro povrchy ve formátu TIN je patrný z obrázku 5.1. Celkový objem je definován jako součet dílčích objemů trojbokých kolmých hranolů vyplňujících souvisle zájmovou oblast a seříznutých rovinami srovnávaných povrchů.

5.1 Pracovní postup provedení výpočtu objemů

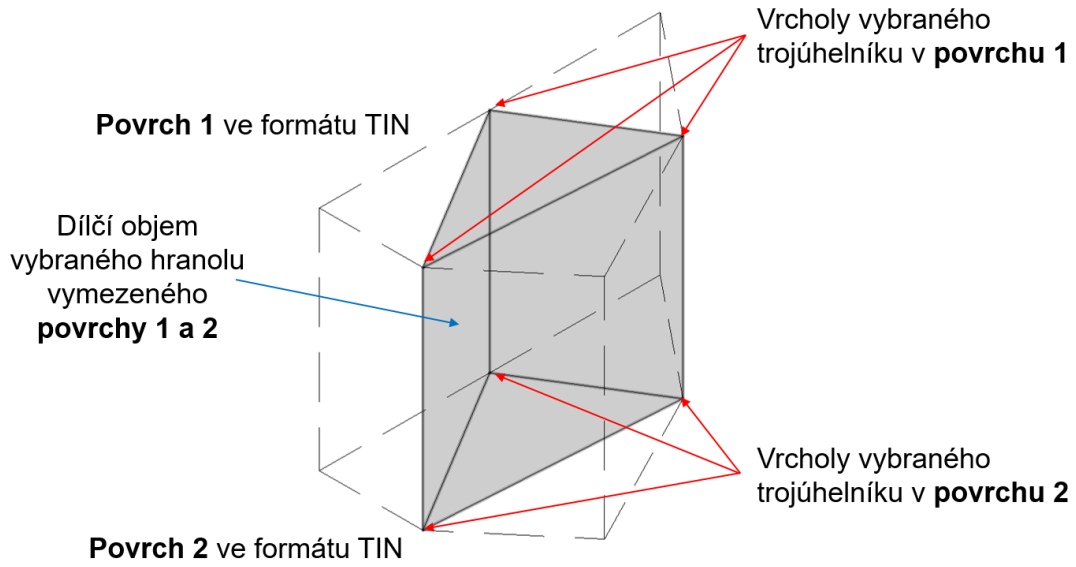
Konkrétní postup realizace výpočtu objemů probíhá v následujících krocích:

1. Zajištění vhodného programového vybavení (např. ArcGIS, Atlas DMT, Autodesk Civil 3D apod.).
2. Import vstupních dat o morfologii dna resp. poloze hladiny (spojité povrchy ve formátu TIN) do zvoleného programu a jejich vizuální kontrola (rozsah, výškové úrovně).
3. Použití nástroje pro výpočet objemu vymezeného povrchy ve formátu TIN.
4. Orientační kontrola vypočtených hodnot objemů.
5. Archivace vypočtených hodnot objemů ve formě popisných dat (číselné údaje, čáry objemů).

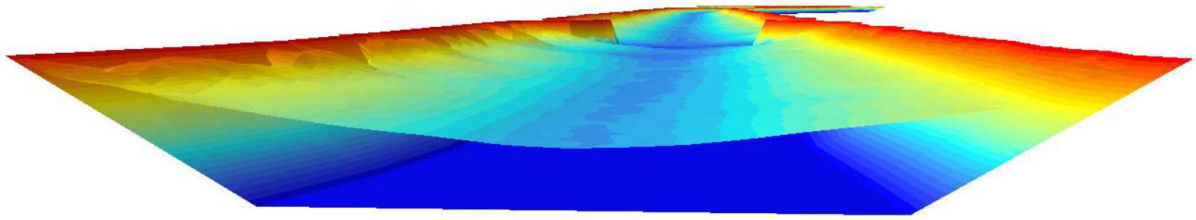
5.2 Příklady využití výpočtů objemů v rámci monitoringu a údržby

Výpočet objemů slouží primárně ke kvantifikaci kubatur nánosů sedimentů popř. výmolů na základě dostupných povrchů dna z různých časových období. Ilustrativní příklad tohoto typu hodnocení lze nalézt na obrázcích 5.2 a 5.3. Výsledkem výpočtů je číselná hodnota vyjadřující objem prostoru mezi dvěma srovnávanými povrchy.

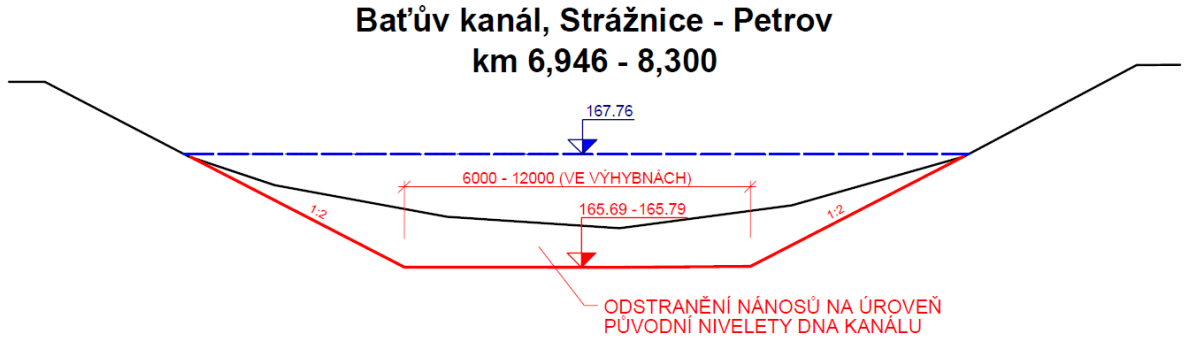
Další možností využití tohoto druhu analýz jsou výpočty objemu prostorů v nádržích resp. sestavení tzv. čáry objemů nádrže. Výsledkem výpočtů jsou číselné hodnoty vyjadřující objem prostoru mezi povrchem hladiny (zpravidla rovinná plocha) a povrchem dna.



Obr. 5.1 Schéma výpočtu objemu vymezeného povrchy ve formátu TIN



Obr. 5.2 Srovnání aktuálního zaměřeného povrchu dna Baťova kanálu s historickým projektovaným stavem



Obr. 5.3 Příklad řezu korytem Baťova kanálu s uvedením aktuálně zaměřeného stavu (černá linie) a historického projektovaného stavu (červená linie)

6 Zdůvodnění „novosti postupů“

Předkládaná metodika reaguje s předstihem na předpokládané výraznější nasazení vícepaprskové ultrazvukové metody (VUM) určené k měření morfologie dna vodních toků a nádrží. Lze jednoznačně konstatovat, že použití technologie VUM je v rámci ČR aktuálně v začátcích. Daná oblast není dosud metodicky zpracována a je proto nesporně žádoucí, aby od počátku zavádění této technologie byly sjednoceny používané postupy pro zpracování naměřených dat. Bude tak zajištěna věcná správnost a vzájemná porovnatelnost dat pořízených v různých časových obdobích, na odlišných lokalitách a různými subdodavateli. První masivnější nasazení technologie VUM bylo realizováno v rámci řešení projektu QJ1520267, přičemž jako jeden z dílčích výstupů uvedeného projektu byly navrženy dvě na sebe navazující metodiky.

První část tvoří, „Metodika komparace diskrétních a spojitých metod měření digitálního modelu terénu“ [1], která je zaměřena na vlastní měření metodou VUM a tematicky se zaměřuje na fáze přípravy a realizace měření.

Navazující druhou část představuje předkládaná metodika, která je orientována na související problematiku zpracování primárních dat pořízených metodou VUM. Deklarovaná "novost postupů" spočívá v doporučení vhodných pracovních postupů zpracování výsledků měření metodou VUM, vycházejících z širokého okruhu známých a dostupných metod pro zpracování geografických dat. Věcná správnost jednotlivých doporučených metod a pracovních postupů byla prakticky ověřena na konkrétních pilotních lokalitách v rámci řešení projektu QJ1520267.

Hlavním záměrem autorů bylo předejít zpracovávání výsledků měření s použitím nevhodných pracovních postupů, které by mohly mít za následek znehodnocení primárních vstupních dat ve smyslu jejich nesprávné interpretace nebo nevhodně provedené analýzy. Se zřetelem k uvedeným cílům byly definovány v praxi nejčastěji využitelné pracovní postupy, které zahrnují:

- digitalizaci vybraných specifických formátů historických analogových podkladů (viz kap. 2),
- tvorbu povrchů dna (viz kap. 3),
- rozdílovou analýzu (viz kap. 4),
- výpočty objemů (viz kap. 5).

Navržené pracovní postupy, určené ke zpracování výsledků měření metodou VUM, nebyly dosud v rámci ČR v ucelené formě publikovány.

7 Popis uplatnění Certifikované metodiky

Předkládaná metodika se zaměřuje na vybrané dílčí činnosti prováděné v rámci monitoringu a údržby vodohospodářské infrastruktury a tematicky navazuje na certifikovanou metodiku „Metodika komparace diskrétních a spojitých metod měření digitálního modelu terénu“ [1]. V rámci navržených pracovních postupů jsou primárně využívány výstupy bezkontaktního měření morfologie dna vícepaprskovou ultrazvukovou metodou (VUM), která umožňuje vytvoření podrobného digitálního modelu morfologie dna a břehů vodních útvarů. Navržené pracovní postupy zahrnují tyto dílčí činnosti:

- digitalizaci historické výkresové dokumentace vodních toků a nádrží za účelem získání údajů o referenčním stavu morfologie dna (viz kap. 2),
- zpracování výsledků zaměření morfologie dna metodami prostorové interpolace (tvorba povrchů - viz kap. 3),
- rozdílové analýzy za účelem vyhodnocení časových změn morfologie dna vodních toků a nádrží (viz kap. 4),
- výpočty objemu sedimentů (viz kap. 5),
- výpočty zásobních objemů vodních nádrží v návaznosti na časové změny morfologie dna (viz kap. 5),

Metodika je určena především správcům vodních toků a nádrží, kteří v rámci svých činností zajišťují plnění definovaných účelů a kapacit koryt a zásobních prostorů vodních nádrží. Konkrétně se jedná o státní podniky Povodí, Lesy ČR, obce ale i soukromé provozovatele jako jsou energetické společnosti, subjekty podnikající v rybníkářství, projekční a stavební firmy. Obsah metodiky může být přínosný i multioborově např. v souvislosti s ochranou životního prostředí, lodní dopravou apod.

Uvedené subjekty mohou pracovní postupy popsané metodikou využívat přímo, pokud disponují technologií VUM, popř. předpokládají zpracování primárních dat z měření pořízených prostřednictvím subdodavatelů. Druhou uvažovanou možností je využití metodiky pro specifikaci pracovních postupů v rámci zadávacích řízení veřejných zakázek na výběr vhodného dodavatele zpracování výsledků měření VUM.

Pro efektivní využití metodiky jsou nezbytné základní uživatelské znalosti práce s kancelářským programovým vybavením (např. Word, Excel apod.), GIS nebo specializovanými programy pro tvorbu digitálního modelu terénu. V případě předpokládaného využívání dat v rámci hydrodynamického modelování je dále nutná uživatelská znalost některého z programů pro 2D numerické modelování proudění vody v tocích a záplavových územích.

8 Ekonomické aspekty

Zavedením předkládané metodiky do praxe dojde ke sjednocení postupů vyhodnocování výsledků měření morfologie dna vodních toků a nádrží, realizovaných metodou VUM. Přímý ekonomický přínos tohoto přístupu spočívá v podstatném zvýšení efektivnosti práce s měřenými daty ve fázích správy, analýzy a interpretace výsledků. Dodržování navržených pracovních postupů zajistí vzájemnou porovnatelnost výsledků zpracovaných v různých časových obdobích, na odlišných lokalitách a případně rozdílnými subjekty. Finanční úspora je v těchto případech dána výrazným omezením rizika znehodnocení primárních měřených dat nebo potřeby jejich opakovaného zpracování.

Další druhotné ekonomické přínosy vyplývají ze zvýšení kvality výstupů v důsledku dodržování navržených pracovních postupů. Konkrétně se jedná o následující ověřitelné výstupy:

- povrchy dna ve formátu TIN, které slouží jako výchozí podklad pro rozdílové analýzy, výpočty objemů a hydrodynamické modelování,
- výsledky rozdílových analýz a výpočtů objemů, sloužící jako podklad pro rozhodování a projekční činnosti v rámci údržby VH infrastruktury.

Zvýšení kvality výše uvedených podkladů znamená úsporu nákladů na údržbu VH infrastruktury díky včasnému a přesnějšímu plánování jednotlivých činností.

9 Seznam použité literatury

[1] Knap, R. a kol. 2018. Metodika komparace diskrétních a spojitých metod měření digitálního modelu terénu. Výzkumný projekt/podpory na rozvoj výzkumné organizace č. QJ1520267 s názvem Systém řízení monitoringu a údržby VH infrastruktury.

[2] Hutchinson, M. F. and Gallant, J. C. 1999. Representation of terrain. In: Geographical Information Systems: Principles, Technical Issues, Management Issues and Applications. Second Edition. Edited by Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W. Wiley, New York, Chapter 9, pp 105-124.

[3] Hutchinson, M.F. and Gallant, J.C. 2000. Digital elevation models and representation of terrain shape. In: Wilson,J.P. and Gallant,J.C. (eds), Terrain Analysis: Principles and Applications, Wiley, New York, Chapter 2, pp 29-50.

[4] Centrální datový sklad pro mapy povodňového nebezpečí a povodňových rizik [online]. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: http://cds.chmi.cz/

[5] GIS slovník. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovnik/index.php?jazykova_verze=cz>

[6] CALETKA, M. a ŠTĚPÁNKOVÁ, P. Stanovení úrovně dna vodních děl z historických projektových dokumentací. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2017, roč. 59, č. 6, str. 24–29. ISSN 0322-8916.

[7] KNAP, R. Bezkontaktní metody průzkumu morfologie vodních útvarů. InGIS, 2017, č. II, str. 4-6. ISSN 1802-6168

[8] ČSN 75 0120 - Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky

10 Seznam publikací, které předcházely metodice

CALETKA, M. a ŠTĚPÁNKOVÁ, P. Stanovení úrovně dna vodních děl z historických projektových dokumentací. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2017, roč. 59, č. 6, str. 24–29. ISSN 0322-8916.

KNAP, R. Bezkontaktní metody průzkumu morfologie vodních útvarů. InGIS, 2017, č. II, str. 4-6. ISSN 1802-6168

ŠTĚPÁNKOVÁ, P., CALETKA, M., KNAP, R., DRÁB, A. Sytém řízeni a monitoringu VH infrastruktury. In Pavel Hucko, Peter Tölgyessy Sedimenty vodných tokov a nádrží. Bratislava, 17. 5. 2017. Bratislava: Slovenská vodohospodárska spoločnosť pri Výskumnom ústave vodného hospodárstva v Bratislave, 2017, s. 11-20. ISBN 978-80-89740-13-0.

11 Seznam zkratek

ČR	Česká republika
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DMR5G	Digitální model reliéfu České republiky 5. generace
DKM	Digitální katastrální mapa
DMT	Digitální model terénu
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite Systém, Globální družicový polohový systém
GIS	Geografický informační systém
TIN	Triangulated Irregular Network (nepravidelná trojúhelníková síť)
VUM	Vícepaprsková ultrazvuková metoda
VD	Vodní dílo
VH infrastruktura	Vodohospodářská infrastruktura
WMS	Web Map Service
ZABAGED	Základní báze geografických dat