

### Vážení čtenáři,

koncem loňského roku jsme si připomněli 95. výročí vzniku dnešního Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. Byl totiž jedním z prvních vědeckých ústavů založených v samostatné republice Čechů a Slováků, a to usnesením ministerské rady z 19. prosince 1919 jako Státní ústav hydrologický.

V počátečním období se výzkum soustředil především na hydrologickou problematiku, ale již po několika letech činnosti se začala rozvíjet i oblast hydrotechnická. V roce 1933 podtrhla význam výzkumného pracoviště i návštěva tehdejšího prezidenta ČSR Tomáše Garrigua Masaryka, jehož jméno nese ústav od roku 1930, s přestávkou v letech 1951–1990, dodnes.



**Návštěva T. G. Masaryka v areálu ústavu**

Poválečný rozvoj československého hospodářství staví vodohospodářský výzkum do nové role – významně se rozvíjí především hydroenergetická výstavba, na což musí reagovat i vodohospodářský výzkum. Dále se v tomto období činnost ústavu rozšiřuje i do oblasti vodárenství a čištění odpadních vod, jsou zřízeny analytické laboratoře, postupně rozšiřované a specializované na jednotlivá pracoviště pro komplexní analýzu jakosti vod. V roce 1951 došlo pak k přejmenování ústavu na Výzkumný ústav vodohospodářský.

To však nebyly jediné organizační změny – ústav se v té době musel vyrovnat i s nutností komplexně řešit specifické vodohospodářské problémy vyvolané industrializací severní Moravy a Brněnska. Proto bylo r. 1949 zřízeno detašované pracoviště v Brně a posíleno pracoviště v Ostravě vzniklé již v roce 1942.

Další významnou změnou, provedenou v roce 1969, bylo zřízení Střediska pro rozvoj vodního hospodářství, organizačně začleněného do VÚV. Středisko řešilo problémy řízení, ekonomiky, organizace, legislativy, informačních prostředků, racionálního hospodaření s vodou a životního prostředí.

Od roku 1990 nastávají v souvislosti s celostátními změnami přechodu od socialistického státního hospodářství k tržním mechanismům také změny ve struktuře, způsobu hospodaření i náplni práce ústavu. Aktivita ústavu se tak soustředila na vodu jako složku životního prostředí. Od roku 1990 dochází postupně k útlumu technologických složek ústavu (vodárenství, čištění odpadních vod), omezují se i aktivity oboru hydrauliky a do popředí vystupuje hodnocení kvality i kvantity vod, jejich ochrana a vytváření zásad vodohospodářské politiky.

Ve druhé polovině 90. let se začínají objevovat činnosti související s přípravou na vstup České republiky do Evropské unie – příprava na implementaci evropské legislativy, příprava systémů a prvků řízení u nás dosud neobvyklých i soustředování nezbytných dat a podkladů. Stále více se také prosazuje environmentální hledisko – na významu nabývá výzkum ve sféře ochrany vod, udržování a zlepšování ekosystémů či hodnocení jakosti vod. Stěžejní odbornou náplní ústavu se v tomto období staly projekty zabývající se hodnocením jakosti vody a jejího prostředí v hlavních povodích ČR – Labe, Moravy, Odry – a to včetně vytváření komplexních návrhů opatření pro zlepšení kvality vod i funkce ekosystémů. Rozšiřuje se také oblast mezinárodní spolupráce, kde se ústav podílí na řešení řady mezinárodních projektů.

V roce 1999 byla náplň ústavu rozšířena o problematiku odpadů a následně vzniklo Centrum pro hospodaření s odpady, a ústav se tak stal základem pro státní a veřejnou správu i v této oblasti.

V posledních letech je ve výzkumu kladen stále větší důraz na ochranu říční sítě, na jakost vod a hodnocení stavu vodních útvarů. V ústavu byly úspěšně řešeny rozsáhlé výzkumné záměry Výzkum a ochrana hydrosféry a Výzkum pro hospodaření s odpady, nezanedbatelná není ani odborná činnost pro podporu výkonu státní správy v řadě oblastí, dále aktivity bezpečnostního výzkumu a řada projektů získaných v rámci soutěží vypsanych Technologickou agenturou ČR aj. Při příležitosti oslav 90. výročí činnosti ústavu navštívil areál také prezident republiky Václav Klaus.

Tuto bohatou historii výzkumné organizace jsme si v průběhu loňského roku připomněli např. neformálním setkáním vodohospodářů v areálu ústavu v květnu, řadou článků mapujících podrobně historii činnosti v rámci jednotlivých oblastí vodohospodářského výzkumu na stránkách časopisu VTEI a v neposlední řadě na tradičním setkání vodohospodářské veřejnosti, zástupců státní správy a samosprávy v rámci Národního dialogu o vodě v červnu 2014.

Konference se zaměřila na hledání odpovědi na otázku „Co nám dělá větší starosti – sucho nebo povodně?“ Tato otázka je spojená s hydrologickými extrémami, které jsou v poslední době stále častějším jevem. Vedle povodní, které jsou významným a nezanedbatelným problémem, je sucho, které prozatím zasáhlo Českou republiku jen okrajově, víceméně opomíjeno.

Z obsáhlých a velmi zajímavých přednášek i následně diskuse vyplynulo, že o povodních, se kterými se v poslední době máme možnost setkat bohužel až příliš často, již mnohé víme a umíme si s řadou problémů poradit, ale více se bojíme toho, co neznáme – tedy sucha. I když nebylo možno postihnout problematiku hospodářských, společenských i environmentálních aspektů výskytu významných suchých období a velkých povodní v plné šíři, celkový závěr letošního Národního dialogu o vodě byl v podstatě jednomyslný. Extrémní sucha mohou i v našich podmínkách znamenat větší ohrožení než povodně, zejména proto, že chybí zkušenosti, informace a prevence. Odborná veřejnost je připravena se výzvou „sucho“ zabývat.

Stručným ohlédnutím za bohatou historií činnosti v oblasti vodohospodářského výzkumu v letech 1919 až 2014 bychom chtěli zahájit nový ročník časopisu Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, který se bude snažit i nadále přinášet nejnovější poznatky z výzkumu v oblasti vod.

# AUTOMATIZACE ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE VODOHOSPODÁŘSKÉ SOUSTAVY

Pavel Menšík, Miloš Starý, Daniel Marton

## Klíčová slova

strategické řízení – optimalizační model – simulační model – systém zásobení vodou – vodohospodářská soustava

## Souhrn

Cílem příspěvku je snaha seznámit odbornou veřejnost s vytvořeným programovým prostředkem SOMVS (Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy) a s možnostmi jeho použití. Program umožňuje automatizované vodohospodářské řešení zásobní funkce vodohospodářských soustav. Automatizace spočívá v sestavení inicializačních matic, sestavení řídicích rovnic, postupném řešení řídicích rovnic a v sestavení dispečerských grafů. Proces automatizace tak umožňuje uživatelům bez hlubších znalostí řešit úlohy optimálního rozvoje a úlohy optimálního řízení systému zásobení vodou. Pro snadnější ovladatelnost je program vybaven intuitivním grafickým uživatelským rozhraním. Konfigurování vodohospodářské soustavy je provedeno pomocí kódových čísel. Kódová čísla umožňují zadat téměř libovolnou reálnou vodohospodářskou soustavu. Program podle potřeby sestaví simulační nebo optimalizační model vodohospodářské soustavy. Modely je možno použít pro řešení úloh optimálního rozvoje a úloh optimálního řízení systému zásobení vodou. Grafické uživatelské rozhraní umožňuje provést nezbytné úpravy programu uživatelem. V rámci úprav je možno modifikovat způsob řízení odtoku vody z nádrží v simulačním modelu a dále u obou modelů upravit tvar kriteriální funkce. Úprava kriteriální funkce umožňuje použití programu i pro jiné účely, například pro řešení hydroenergetické funkce soustavy nádrží.

## Úvod

Podle výsledků výzkumu [1] je účinek klimatických změn na minimální průtoky velmi významný a indikuje ohrožení zásobní funkce vodních zdrojů, které nemají dostatečnou akumulaci pro překrytí období sucha. Jednou z možností, jak předejít nebo úplně zabránit vzniku těchto problémů, je výstavba vodních nádrží nebo přehodnocení velikosti zásobních a ochranných objemů stávajících nádrží a změna způsobu manipulace s řízeným odtokem.

Povodňové události z let 2002 a 2013 otevřely v České republice širokou diskusi o roli vodních nádrží při zvládnutí extrémních hydrologických situací. V této souvislosti je třeba odlišovat operativní řízení nádrží, které sleduje optimalizaci manipulací v rámci vodoprávně projednaných manipulačních řádů, zpravidla s využitím prostředků předpovědních systémů, a řízení strategické, které představuje změny v základních parametrech nádrží a funkčních objektů přehrad v souvislosti se změnami v prioritách jejich účelů. V současné době jsme svědky zesílené společenské poptávky nejen ve smyslu zdokonalování operativního řízení, ale rovněž ve smyslu změn základních strategických parametrů nádrží často s cílem významného posílení jejich retenční funkce [2].

Ke zdokonalení strategického řízení provozu nádrží je potřeba mít k dispozici odpovídající moderní programové prostředky. Dříve byly pro modelování používány velké sálové počítače a pro ně explicitně zpracované programy. Mezi těmito programy je možno například uvést SIM-VS [3, 4]. Ve Spojených státech amerických ve státě Texas byl v oddělení vodních zdrojů od roku 1969 vyvíjen počítačový program SIM Model. Pátá generace programu SIM-V Model [5] umožňovala simulovat a optimalizovat vodohospodářské soustavy a řešit v nich hydroenergetickou funkci. Program postrádal grafické uživatelské rozhraní. Pro práci s programem musel mít uživatel pokročilé znalosti v oblasti programování a také výbornou znalost vlastní filozofie programu.

Dále je například možno uvést programy AQUATOOL [6], MODSIM [7], HEC-ResSim [8], RIBASIM [9], Wargi-SIM [10] a WEAP [11]. Uvedené programy jsou vybaveny grafickým uživatelským rozhraním a jsou vytvořeny v souladu s dnešní úrovní výpočetní techniky. Programy umožňují simulovat provoz vodohospodářské soustavy. Při simulaci toku vody je v programech používán složitý model říční sítě, který potřebuje mnohonásobně více vstupů, než vyžaduje vlastní zjednodušené vodohospodářské řešení zásobní funkce.

V současnosti není v ČR znám žádný programový prostředek, který by komplexně využíval dnešní úrovně výpočetní techniky a umožňoval zjednodušené řešení zásobní funkce vodohospodářské soustavy.

## Metody

Při definici vodohospodářské soustavy systémem zásobení vodou je z vodohospodářské soustavy vyjmuta pouze ta množina prvků a vazeb, která má přímý vliv na funkci zásobení vodou.

### Matematický model zásobní funkce vodohospodářské soustavy

Obecně se teorií grafů a tokem v sítích zabývali například autoři v [12, 13]. Systém zásobení vodou je definován konstrukcí orientovaného ohodnoceného grafu  $G(N, H)$  [14].  $G(N, H)$  je tvořen množinou vrcholů grafu  $N$  ( $n_i \in N$ ) a hran grafu  $H$  ( $h_{i,j} \in H$ ). Množina vrcholů  $N$  je tvořena vrcholy vodních zdrojů, rozdělovacími uzly, nádržemi a odběrateli vody. Množinu hran grafu  $H$  tvoří koryta řek.

Při strategickém řízení toku vody systémem je délka časového kroku nejčastěji jeden měsíc. Doba, za kterou voda proteče celým systémem, je obvykle výrazně kratší než délka zvoleného časového kroku. Uvedený předpoklad umožňuje zanedbat přechodové jevy ve hranách grafu. Spojité průtoky jsou na řešeném období nahrazeny průměrnými měsíčními průtoky. Výpočet toku vody hranami grafu je řešen zjednodušeně prostým bilancováním.

Pro systém zásobení vodou (strategické řízení) jsou formulovány dva základní typy úloh. Úloha optimálního řízení systému a úloha optimálního rozvoje systému. Úlohu optimálního řízení je možno použít všude tam, kde hledáme optimální tok vody systémem s definovanou strukturou, například pro strategické řízení systému při existenci předpovědi přítoků vody do systému. Řešení úlohy optimálního rozvoje se provádí v případech, kdy struktura stávajícího systému přestane být dostačující a hledá se její nová podoba. Řešení je pak třeba provádět pro velmi dlouhé období, zahrnující v reálných průtokových řadách desítky, v umělých pak stovky, tisíce až desetitisíce let.

Obě úlohy je možno formulovat jako nalezení vektoru neznámých  $\underline{X}$ , který obsahuje všechny neznámé veličiny. Matematický model vychází z řídicích rovnic, které jsou dlouhodobě známé a detailně zpracované například v [14].

Pro stanovení jednoznačného řešení je nutné definovat kriteriální funkci, jež je funkcí hodnoty vektoru  $\underline{X}$ . Výsledným řešením je pak ta hodnota vektoru  $\underline{X}$ , pro kterou kriteriální funkce dosahuje požadovaného extrému. Tvar kriteriální funkce závisí na řešeném účelu.

K nalezení optimálního řešení je možné použít optimalizační model nebo simulační model. Rozdíl obou přístupů je ve způsobu řešení. U optimalizačního modelu je vektor neznámých  $\underline{X}$  vyčíslován souhrnně jako celek. Uvedené řešení nevyžaduje zadání způsobu řízení systému. U simulačního modelu je vektor neznámých  $\underline{X}$  vyčíslován postupně pro jednotlivé časové kroky a musejí být zadána pravidla řízení odtoku vody z nádrží.

### Program SOMVS

Program SOMVS (Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy) [15] je vytvořen a dále vyvíjen na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební, Ústavu vodního hospodářství krajiny. SOMVS umožňuje automatizované vodohospodářské řešení zásobní funkce vodohospodářských soustav. Program je vytvořen obecně tak, aby pomocí kódových čísel bylo možno zadat téměř libovolnou reálnou konfiguraci soustavy nádrží.

Výpočtový modul programu je napsán v programovacím jazyce FORTRAN 77. Modul podle požadavku automatizovaně sestaví optimalizační nebo simulační model libovolného systému zásobení vodou a řeší na něm úlohy optimálního řízení a optimálního rozvoje.

Program je vybaven grafickým interaktivním uživatelským rozhraním. Uživatelské rozhraní je vytvořeno ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio za použití programovacího jazyka Microsoft

Visual C#. Rozhraní umožňuje uživateli jednoduše ovládat program. Uživatel může jednoduše vložit a editovat vstupní data a zobrazovat dosažené výsledky. Výsledky jsou uvedeny v přehledných tabulkách a grafech s možností tisku. Na obr. 1 je zachyceno úvodní okno programu SOMVS s vygenerovaným schématem definované vodohospodářské soustavy.

Pomocí editoru, který je součástí uživatelského rozhraní, může uživatel se základními znalostmi programování zasáhnout do příslušných částí zdrojového kódu (upravit kritériální funkci, upravit pravidla řízení systému nádrží). Úprava kritériální funkce a pravidel řízení se provádí v programovacím jazyce FORTRAN 77. Po provedení jednoduché úpravy kritériální funkce může být program použit pro jiné účely, například pro řešení hydroenergetické funkce soustavy nádrží.

Při řešení úlohy optimálního rozvoje optimalizačním modelem je možno ve výpočtu uvažovat s vlivem ztrát vody z nádrží. Při řešení úlohy optimálního rozvoje simulačním modelem lze ve výpočtu uvažovat vliv ztrát (zjednodušený / přesný výpočet) a podzemní odtok vody z mezipovodí. V případě použití simulačního modelu musí být zadány pravidla řízení odtoku vody z nádrží. V programu je možno použít algoritmus řízení systému zásobení vodou, který je založený na teorii stavů nádrží [16]. Pokud je algoritmus řízení použit, výpočtový modul automaticky sestaví dispečerský graf pro každou nádrž v systému. Pokud algoritmus řízení není použit, je odtok vody z nádrže roven nalepšenému odtoku nebo je možno způsob řízení odtoku vody z nádrží upravit v editoru pomocí zavedených pravidel.

U simulačního modelu lze při vodohospodářském řešení uvažovat s vlivem nejistot členů reálných průtokových řad. Náhodné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků, jejichž členy jsou zatíženy nejistotami a které jsou prezentované spektrem náhodných řad průměrných měsíčních průtoků, vygenerovaných kolem středních hodnot ve stylu Monte Carlo, je možno do programu importovat. Opakované vodohospodářské řešení pak vede ke spektru výsledků, které je následně nutno statistickými metodami vyhodnotit. Uvedený způsob vodohospodářského řešení aplikovaný na jednu nádrž je publikován v [17].

K nalezení optimálního řešení je možno použít klasickou mřížkovou optimalizační metodu, metodu Monte Carlo a metodu diferenciální evoluce.

### Aplikace a výsledky

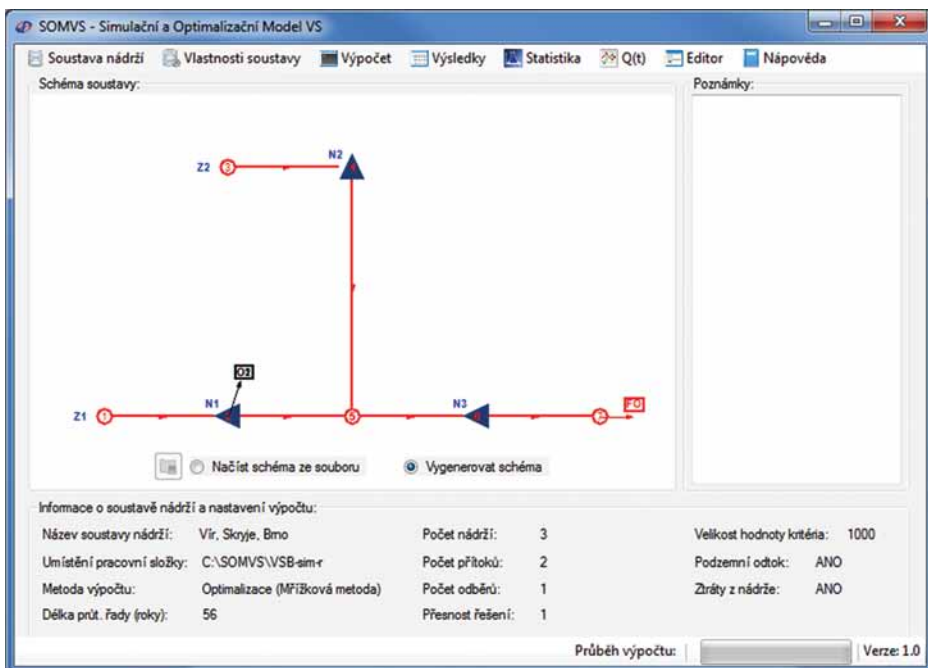
Program je demonstrativně aplikován na úloze optimálního rozvoje a na úloze optimálního řízení. K řešení úlohy optimálního rozvoje je použit simulační model a k řešení úlohy optimálního řízení je použit optimalizační model. Vstupní reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků poskytl ČHMÚ, pobočka Brno. Technické údaje k nádržím byly poskytnuty s. p. Povodí Moravy.

### Úloha optimálního rozvoje

Úloha optimálního rozvoje je aplikována na subsystém nádrží Vír I (dále jen Vír), Brno a uvažovanou nádrž Skryje. Vír a Brno jsou nádrže existující a nádrž Skryje je nádrž navrhovaná. Nádrže Vír a Brno leží na vodním toku Svratka a nádrž Skryje leží na vodním toku Bobrůvka/Loučka. Z nádrže Vír je uvažováno s odběrem vody (obr. 2).

Pro zjednodušené řešení úlohy optimálního rozvoje je vytvořena hypotetická situace, kdy je zvolen takový požadovaný minimální zůstatkový průtok pod nádrží Brno, který vyvolá napjatou hydrologickou situaci v řešeném systému. Situace bude vyžadovat doplnění kaskády nádrží Vír a Brno o další akumulaci prostor (zásobní objem nádrže), který je hledán v profilu Skryje na vodním toku Bobrůvka.

Optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje je hledána v reálné průtokové řadě průměrných měsíčních průtoků. Délka průtokové řady je 56 let. Při řešení je uvažováno s vlivem ztrát vody



Obr. 1. Úvodní okno grafického uživatelského rozhraní

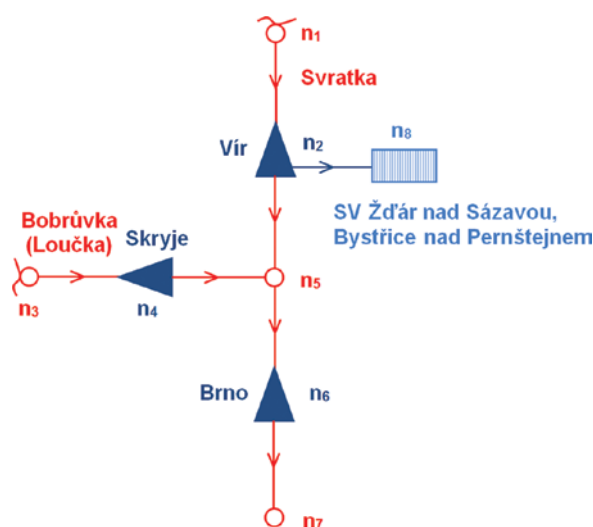
Fig. 1. The main window of the graphical user interface

z nádrží (zjednodušený a přesný výpočet) a s podzemním odtokem z mezipovodí.

K provedení přesného výpočtu ztrát vody je pro každou nádrž v systému nutná znalost čáry zatopených ploch, čáry zatopených objemů a závislosti ztrát průsakem a netěsností uzávěrů na výšce plnění vody v nádrži. Zjednodušený výpočet ztrát vody se uplatní v případě, kdy není k jednotlivým nádržím k dispozici dostatek potřebných informací.

Odtok z jednotlivých nádrží je řízen na předepsané hodnoty nalepšených odtoků. Kritériální funkce je vyjádřena pomocí hydrologické zabezpečení dodávky vody odběrateli vody z nádrže Vír a hydrologických zabezpečení ve hranách grafu pod jednotlivými nádržemi. K nalezení optimálního řešení je použita mřížková optimalizační metoda.

Nalezená optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje je v řešení uvažujícím se zjednodušeným výpočtem ztrát vody z nádrží rovna hodnotě 6 126 094 m<sup>3</sup>. V případě řešení uvažujícího s přesným výpočtem ztrát je optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje rovna hodnotě 6 494 349 m<sup>3</sup>. Při řešení s přesným výpočtem ztrát



Obr. 2. Schéma subsystému nádrží Vír, Skryje a Brno

Fig. 2. Diagram of the water reservoirs subsystem of Vír, Skryje, and Brno



vody je nalezená optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje větší o 368 255 m<sup>3</sup> než při řešení se zjednodušeným výpočtem ztrát.

### Úloha optimálního řízení

Úloha optimálního řízení je aplikována na nádrž Mostiště, která leží na vodním toku Oslavy. Řešení úlohy optimálního řízení spočívá v nalezení optimálního odtoku vody z nádrže Mostiště. Při řešení není uvažováno s vlivem ztrát vody z nádrže.

Kriteriální funkce je vyjádřena v aditivním tvaru pomocí technických ukazatelů:

$$\left[ \pi = \sum_{\tau=1}^N (W_{\tau} - O_{\tau})^2 \right] \rightarrow \text{MIN} \quad (1).$$

Neznámé hodnoty průtoků během jednotlivých časových kroků  $\tau$  ve sledované hraně pod nádrží Mostiště jsou řízené odtoky  $O_{\tau}$ . Snahou je, aby se v každém časovém kroku vždy v celém řešeném období  $N$  řízené průtoky přiblížily předepsanému řídicímu průtoku  $W_{\tau}$ . Řídicí (požadovaný) průtok je demonstrativně zvýšen tak, aby byla uměle vyvolána napjatost mezi vydatností přítoku a požadovaným odtokem, jehož velikost je 4 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. K nalezení optimálního toku vody systémem je použita optimalizační metoda diferenciální evoluce. Účelem takto zvoleného tvaru kriteriální funkce (1) je rozložit případnou nedodávku vody pokud možno rovnoměrně na jednotlivé měsíce.

Počet řešených časových kroků v optimalizačním modelu je šest měsíců a odpovídá délce předpovězeného období. V příspěvku je použit jednoduchý předpovědní model průměrných měsíčních průtoků vyvinutý na VUT v Brně, Fakultě stavební, Ústavu vodního hospodářství krajiny. Předpovědní model vychází z teorie pravděpodobnosti a velikosti aktuálního přítoku vody do nádrže. Použitý model byl publikován například v [18]. Pro srovnání úspěšnosti řízení na předpovězené hodnoty je řešení obdobně provedeno rovněž v reálné průtokové řadě. Z pohledu předpovědaných hodnot pak pracujeme s předpovědí, která má 100% přesnost – odpovídá skutečnosti. Při výpočtu je aplikován princip adaptivity. Adaptivita vychází z principu metod umělé inteligence [19]. V praxi je možno adaptivitou částečně eliminovat nepřesnost předpovědi vyplývající ze skutečnosti, že řešení je prováděno v podmínkách značné neurčitosti.

Řízení je demonstrativně aplikováno na období trvající dva roky. Na obr. 3 je zobrazen průběh průměrných měsíčních přítoků vody do nádrže (Přítok). Požadovaný řídicí odtok z nádrže je zobrazen průběhem nalepšeného odtoku (Op). Dále jsou v obrázku zobrazeny dva průběhy s řízenými odtoky. Průběh řízených odtoků (Řízení OM – R) odpovídá nalezenému optimálnímu řízení realizovanému na základě znalosti 100% předpovědi. Průběh řízených odtoků (Řízení OM – P) odpovídá nalezenému optimálnímu řízení realizovanému na základě předpovězených přítoků. Průběh řízených odtoků (Řízení Op) zobrazuje řízení realizované simulačním modelem. Řízení je provedeno v každém časovém kroku na hodnotu Op, pokud je nádrž schopna Op zajistit.

Z výsledků uvedených na obr. 3 je patrné, že při řízení na hodnotu nalepšeného odtoku Op vznikne menší počet poruchových měsíců, které jsou však hlubší než při řízení provedeném optimalizačním modelem. Vyšší počet poruchových měsíců u optimalizačního modelu umožňuje snížit hloubku poruch. Při vzájemném srovnání výsledků řízení optimalizačním modelem je zřejmé, že mírně horší výsledky jsou získány řízením na předpovězené průtoky. Tato skutečnost je zcela logická a je nutno brát v potaz, že v praxi nebudou nikdy 100% předpovědi k dispozici. Dosažené výsledky je proto možno hodnotit velmi optimisticky vzhledem k možnosti nasazení modelu v praxi.

### Závěr

Popisovaný program SOMVS může být v praxi aplikován na různé systémy zásobení vodou. Na modelovaných systémech zásobení vodou je možno řešit různé úlohy optimálního rozvoje a optimálního řízení.

Předností programu je možnost zadat libovolnou reálnou vodohospodářskou soustavu pomocí kódových čísel. Přímo z uživatelského rozhraní je možno provést úpravu způsobu řízení (simulační model) a lze také provést úpravu kriteriální funkce u obou typů modelů. Úpravou způsobu řízení a kriteriální funkce je možno program snadno aplikovat i pro řešení jiných účelů, například hydroenergetiku.

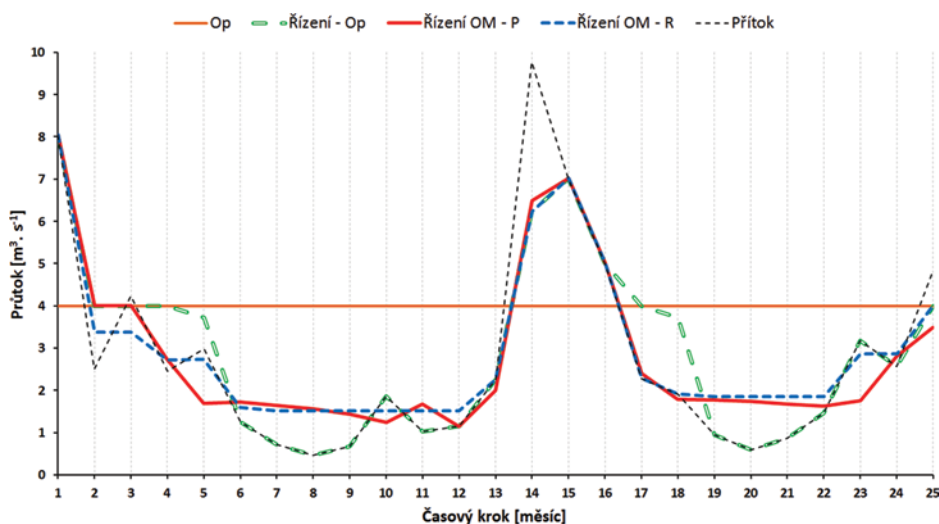
Program je možno nainstalovat na počítač s 32bitovým i 64bitovým procesorem a s operačním systémem Microsoft Windows (verze XP až 8). Samotná instalace je provedena pomocí klasického instalátoru. Program je volně k dispozici v ceně HW klíče (Aladdin HASP LH).

### Poděkování

Článek je výsledkem specifického výzkumu FAST-S-14-2454 Řízení provozu zásobní funkce soustavy nádrží s použitím optimalizačního modelu a výstupem projektu CZ.1.07/2.3.00/30.0039 Excelentní mladí vědci na VUT v Brně.

### Literatura

- [1] Kašpárek, L., Peláková, M. a Boersema, M. Odhad objemu nádrží potřebného pro kompenzaci poklesu odtoku klimatické změny. Praha: VÚV, 2005, 43 s.
- [2] Fošumpaur, P., Kendík, T. a Březina, K. Zodpovědný přístup při řešení možných záměrů strategického řízení nádrží. In: XXXIV. přehradné dni 2014. Slovenská republika, Horný Smokovec, 2014, s. 89–90. ISBN 978-80-971596-6-5.
- [3] Zeman, V. Programování počítače při řešení vodohospodářských soustav simulační metodou. *Vodní hospodářství*, 1974, č. 7, s. 181–183.
- [4] Kos, Z. a Zeman, V. Vodohospodářské soustavy ve Směrném vodohospodářském plánu. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1976, 271 s.
- [5] Martin, Q.W. Multireservoir simulation and optimization user's manual SIM-V: Program documentation and user's manual, Rep. UM-38, Texas Department of Water Resources, Austin, Tex, USA, 1982.
- [6] Andreu, J., Capilla, J., and Sanchis, E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 1996, vol. 177(3–4), p. 269–291.
- [7] Labadie, J.W., Baldo, M.L., and Larson, R. MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual. Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, Ft Collins, Colorado, 2000.
- [8] Klipsch, J.D. and Hurst, M.B. HEC-ResSim, Reservoir System Simulation User's Manual, Version 3.0, U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2007.
- [9] Delft Hydraulics. River Basin Planning and Management Simulation Program. In: *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: „Summit on Environmental Modelling and Software“*, Voinov, Jakeman & Rizzoli (eds), International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, Vermont, 2006.
- [10] Sechi, G.M. and Sulis, A. Water System Management through a Mixed Optimization-Simulation Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2009, vol. 135 (issue 3), p. 160–170.
- [11] SEI Stockholm Environment Institute. WEAP: Water Evaluation and Planning System, User Guide, Somerville, Massachusetts, 2005.



**Obr. 3.** Výsledné řešení úlohy optimálního řízení  
**Fig. 3.** The result solution of the optimal control problem

- [12] Ford, L. and Fulkerson, D. Flows in networks. Princeton: Princeton University Press, 1962.
- [13] Kennington, J.L. and Helgason, R.V. Algorithms for network programming. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [14] Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Brno: VUT, 1986.
- [15] Menšík, P. a Starý, M. SOMVS – Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy, dostupné z: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/somvs.php>
- [16] Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Metodické návody do cvičení. 1. vyd. Brno: VUT, 1987.
- [17] Marton, D., Starý, M. a Menšík, P. The Influence of Uncertainties in the Calculation of Mean Monthly Discharges On Reservoir Storage. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2011, vol. 59.
- [18] Menšík, P., Starý, M., and Marton, D. Using Predictive Models of Mean Monthly Flows for Operative Outflows Control from Large Open Reservoirs. In Proceedings ITISE 2014, International work-conference on Time Series. Granada, Spain, 2014, p. 382–395. ISBN: 978-84-15814-97-9.
- [19] Nacházal, K., Starý, M. a Zezulák, J. Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství. Praha: Academia, 2004.

Ing. Pavel Menšík, Ph.D.  
 prof. Ing. Miloš Starý, CSc.  
 Ing. Daniel Marton, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
 mensik.p@fce.vutbr.cz  
 +420 541 147 773

*Příspěvek prošel lektorským řízením.*

#### Key words

*strategy control – optimization model – simulation model – water supply system – water management system*

## VÝVOJ SOFTWAREVÝCH NÁSTROJŮ CROSOLVER A CROSOLVER FOR ARCGIS PRO PŘÍPRAVU VÝPOČETNÍ TRATĚ HYDRODYNAMICKÝCH MODELŮ

Radek Roub, Filip Urban, Vojtěch Havlíček, Pavel Novák, Tomáš Hejduk, Luděk Bureš, Adam Reil

#### Klíčová slova

*letecké laserové skenování (LLS) – hydrologické měření – příčný profil – hydrodynamický model – GIS – povodně*

#### Souhrn

**Povodňové situace představují na území České republiky jednu z nejvýznamnějších hrozeb přírodních katastrof. Význam těchto hrozeb se zvyšuje v důsledku narůstající extremity počasí, ke které v posledních letech dochází. Tato skutečnost je dána polohou České republiky v kontinentálním i celosvětovém měřítku. Z hlediska eliminace potenciálního ohrožení a samotných následků těchto událostí jsou významné informace předpovědní povodňové služby o charakteru a o rozsahu záplavových území pro jednotlivé N-leté povodňové průtoky a konkrétní povodňové scénáře. Adekvátní představu o hloubkách a rychlostech při povodňové události, v podélném či příčném profilu vodního toku, poskytují hydrodynamické modely. Získané informace z hydrodynamických modelů tak zaujímají výsadní postavení z pohledu ochrany životů i zmírnění škod na majetku občanů.**

**Pro získání relevantních výstupů z hydrodynamických modelů jsou rozhodující vstupní data. Ve vazbě na finanční náročnost získání relevantních dat o morfologii koryta vodního toku a přilehlé inundace je prezentován přístup založený na syntéze dat hydrologického měření a dat leteckého laserového skenování, který se snaží nahradit finančně náročné geodetické zaměření koryt vodních toků. Je uvažován postup, kdy je nejprve provedeno letecké laserové skenování vodního toku a stanoven průtok, který byl dosažen v době provádění leteckého laserového skenování**

*An automation solution of storage function of a multi-reservoir system (Menšík, P.; Starý, M.; Marton, D.)*

**The aim of this paper is an effort to give information to the expert public about the created program tool SOMVS (Simulation and Optimization Model of Water Management System) and its application possibilities. The program allows an automated solution of the water supply function of water management systems. The automation consists in an assembly of initialization matrices, an assembly of the governing equations, in sequential solution of the governing equations and an assembly of the dispatcher graphs of reservoirs. The process of automation allows users without special knowledge to solve the optimal development tasks and optimal control tasks of a water supply system. The program has an intuitive graphical user interface for easier handling. Configuring of the water management system is made using codes numbers. Codes numbers allow enter any configuration of a real water management system. According to requirements the program can assemble a simulation or optimization model of a water management system. The models can be used for solving the optimal development tasks and optimal control tasks of a water supply system. The graphical user interface allows the users to make necessary adjustments of the program. In the frame of the adjustments the control of the water runoff from the reservoirs in the simulation model can be modified and the form of the criterial function of the both models can be modified, too. Modification of the criterial function allows using the program for other purposes such as hydropower function of the reservoir system.**

(LLS). Toto měření LLS neumožňuje zahrnout část koryta pod hladinou vodního toku, zahrnuje však polohu hladiny. Následně je dopočet sklon hladiny mezi zvolenými příčnými profily a za předpokladu znalosti typu příčného profilu (v současnosti jsou uvažovány tři základní typy – obdélník, lichoběžník, parabola) a stanoveného průtoku je pomocí Chézyho rovnice dopočtena hloubka koryta.

V daném příspěvku jsou prezentovány výsledky z vývoje dvou softwarových nástrojů, které slouží pro přípravu výpočetní tratě do hydrodynamických modelů (CroSolver a CroSolver for ArcGIS) a prezentovány dílčí výsledky.

#### 1 Úvod

Pro simulaci hydraulických jevů se využívají hydrodynamické modely, které jsou schopny na základě schematizace reálného prostředí a rovnic popsat a znázornit proudění vody. Podle schematizace reálného prostředí můžeme hydrodynamické modely dělit podle různých kritérií. Jedním z nich je dimenze modelu, kde rozlišujeme modely jednorozměrné (1D), dvourozměrné (2D) a popř. jejich kombinaci (1D/2D).

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

Geodetické zaměření koryta a inundace vodních toků bývá časově i finančně nejnáročnějším způsobem pro zajištění informací o geometrii vodních toků s ohledem na velikost zaměřeného bodového pole (Bharat and Mason, 2001). Cobby et al. (2001) navíc uvádí, že vstupní data pro tvorbu výpočetní geometrie vodního toku jsou jedním z nejdůležitějších podkladů pro hydrodynamické modely.

Pro tvorbu hydrodynamických modelů a následné vyhodnocení výsledků simulací i pro zpracování navazujících rizikových analýz jsou používány tři základní způsoby pořízení výškopisných dat:

- geodetické zaměření příčných profilů (koryto + inundace),
- letecké laserové skenování,
- fotogrammetrie.

Při geodetickém zaměření koryta a inundace se obecně maximální vzdálenosti mezi jednotlivými příčnými profily pohybují v rozsahu od několika desítek metrů až po stovky metrů s ohledem na variabilitu tvaru říčního koryta. Jak uvádí Drbal aj. (2009), standardní vzdálenost příčných profilů v intravilánu se pohybuje v intervalu od 50 m až do 100 m a 200 až 400 m v extravilánu. Důležitou podmínkou při prováděním zaměření je, aby zaměřením byla co nejvýstižněji zachycena prostorová variabilita vodního toku a přilehlé inundace a byly zachyceny všechny významné změny v geometrii koryta, tj. změny příčného průřezu koryta, změny podélného sklonu apod. (Ramsankaran et al., 2010; Novák et al., 2011).

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 digitálního modelu reliéfu (DMR) je v případě letecké fotogrammetrie tvořena základní vrstvou 3D bodů, která je doplněna vyhodnocením významných terénních hran v podobě 3D linií (Merwade et al., 2008). Maximální krok rastru bodů by neměl překročit hodnotu 25 metrů (optimální hodnota činí 10 až 15 m), vyhodnoceny musí být veškeré terénní hrany a lomy, jejichž relativní výška je větší než 25 cm. Požadovaná přesnost je definována maximální polohovou odchylkou 0,5 m a střední výškovou chybou 0,11 m. Nízká časová náročnost oproti standardnímu geodetickému měření umožňuje častější opakování, a tím i udržování aktuálnosti dat (Metodický pokyn, 28181/2005-16000).

Třetí způsob sběru prostorových dat pro tvorbu výpočetní geometrie vodních toků do hydrodynamických modelů představuje letecké laserové skenování, které definuje Dolanský (2004) jako jednu z nejmodernějších technologií pro pořizování prostorových geografických dat. Ačkoliv je letecké laserové skenování velmi mladou technologií sloužící k mapování zemského povrchu a k tvorbě DMR nebo digitálních modelů povrchu (dále DMP), nachází své uplatnění v mnoha praktických disciplínách (Cobby et al., 2001; Guenther et al., 2000; Flood and Gutelius, 1997; Maas and Vosselmann, 1999; Elberink and Maas, 2000). Již Ritchie (1996) ukázal na významné postavení leteckého laserového skenování při sběru údajů potřebných pro hydrologické studie, což potvrzují i výsledky dalších autorů (Cobby et al., 2003; Merwade et al., 2008; Cook and Merwade, 2009).

Letecké laserové skenování je vyvinuto pro rychlé a operativní mapování rozsáhlých území, kde standardní metody (tachymetrie, GPS, fotogrammetrie) již nestačí (Dolanský, 2004).

Pokud je základem DMR letecké laserové skenování, je obvyklým výstupem mračno 3D bodů o vysoké hustotě. Dolanský (2004) uvádí, že značná hustota eliminuje nutnost samostatného vyhodnocení terénních lomů a hran, krok rastru však musí být dostatečně jemný. Z hlediska vystižení významných terénních tvarů (koryta, násypy komunikací apod.) numerickým modelem musí být krok rastru maximálně 2 až 3 metry.

Samotná metoda LLS je založena na principu odrazu laserových paprsků, které interpretují obraz měřených objektů laserovému paprsku. Na základě tohoto paprsku vyslaného k zemskému povrchu je změřena 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 (Šíma, 2009). 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 tří základních skupin – terén, vegetace, zástavba. Vedlejšími kategoriemi vzniklými reklasifikací mračna bodů jsou ještě chyby a mosty.

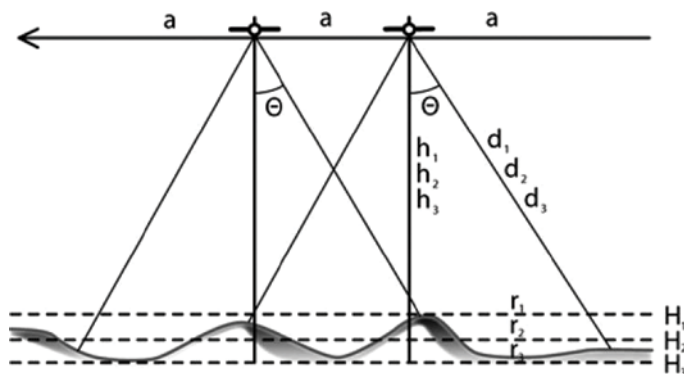
Technologie LLS umožňuje sběr výškopisných dat, vyznačující se rychlostí měření ve vazbě na množství měřených dat a informací. Ve spojení s poměrně vysokým stupněm automatizace jejich zpracování při vytváření digitálního modelu terénu a povrchu představuje jednu z neefektivnějších metod pro získávání prostorových dat (Dušánek, 2008).

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

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

Základní parametry leteckého laserového skenování vycházejí z rozměrů skenovaných bloků, které jsou až 10 x 30 km v závislosti na vertikální členitosti území. Podle převládající nadmořské výšky území jsou jednotlivé bloky skenovány z letových hladin 1 800 m n. m., 2 100 m n. m. a 2 400 m n. m. Základní parametry letů podle Brázdila (2009) jsou zřejmé z obr. 1 a jsou uvedeny v tabulce 1.

K ověření a definování charakteristik přesnosti a kvality dat DMR 4G a DMR 5G byly využity tři sady kontrolních dat (Brázdil et al., 2012a, b):



Obr.1. Parametry leteckého laserového skenování  
Fig. 1. Parameters of aerial laser scanning

Tabulka 1. Parametry leteckého laserového skenování  
Table 1. Parameters of aerial laser scanning

Parametr	Hodnoty		
Nadmořská výška letu (letová hladina) (H)	1 800 m	2 100 m	2 400 m
Střední výška letu nad terénem (h)	1 500 m	1 500 m	1 250 m
Minimální nadmořská výška skenovaného území (H3)	100 m	400 m	700 m
Střední nadmořská výška skenovaného území (H2)	300 m	600 m	1 150 m
Maximální nadmořská výška skenovaného území (H1)	500 m	800 m	1 600 m
Vzdálenost letových drah (a)	833 m	833 m	769 m
Překryt skenování (q)	45–59 %	45–59 %	30–64 %
Maximální vychýlení paprsku (Θmax)	30 °	30 °	30 °
Minimální délka paprsku v nadíru (h1)	1 300 m	1 300 m	800 m
Maximální délka paprsku v nadíru (h3)	1 700 m	1 700 m	1 700 m
Minimální radiální vzdálenost (r1)	750,5 m	750,5 m	462 m
Maximální radiální vzdálenost (r3)	981,5 m	981,5 m	981,5 m
Maximální délka paprsku na okraji skenování (d3)	1 963 m	1 963 m	1 963 m



- soubory kontrolních bodů na komparačních základnách,
- výšky vybraných bodů základního geodetického bodového pole (trigonometrických a zhušťovacích bodů),
- kontrolní geodetická měření realizovaná lokálně pro ověření přesnosti DMR 4G.

Nejprůkaznější se ukázala metoda ověření přesnosti kontrolním měřením v terénu, kdy bylo alespoň na menších vzorcích dat snahou dokumentovat přesnost interpolace výšky bodu z DMR 4G (DMR 5G) v terénu s různým vegetačním krytem, zástavbou nebo častým výskytem terénních tvarů s hranami v území přetvořeném lidskou činností. Pro každý geodeticky zaměřený bod o souřadnicích x, y, H<sub>GEO</sub> (S-JTSK, Bpv) byla bilineární interpolací vypočítána odpovídající výška H<sub>4G</sub> z DMR 4G a výškový rozdíl.

$$\Delta H = H_{4G} - H_{GEO}, \text{ respektive } \Delta H = H_{5G} - H_{GEO}$$

Statistickým zpracováním byly stanoveny parametry přesnosti DMR 4G (DMR 5G) ve výše uvedených kategoriích povrchu a půdního krytu (*tabulka 2, tabulka 3*).

Dosavadní ověřovací zkoušky parametrů přesnosti potvrzují, že deklarované úplné střední chyby výšky mírně generalizovaného modelu reliéfu – DMR 5G (0,18 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 0,3 m v terénech pokrytých hustou vegetací) a generalizovaného modelu reliéfu – DMR 4G (0,30 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 1 m v terénech pokrytých hustou vegetací) jsou dosaženy.

Data získaná metodou LLS jsou v oblasti vodního hospodářství průběžně testována při mapování rozvodnic povodí vodních toků, pro zpřesnění poloh os vodních toků (Uhlířová a Zbořil, 2009), tvorbě geometrie vodních toků (Roub et al., 2012a, b; Novák et al., 2011), při tvorbě map povodňových rizik (Pavličková et al., 2012).

Program kvantitativního monitoringu povrchových vod (PV) představuje v metodě syntézy dat LLS s hydrologickým měřením nezastupitelnou úlohu. Samotný program kvantitativního monitoringu zahrnuje monitoring vodních toků a vybraných vodních útvarů stojatých vod, přičemž z hlediska uplatnění při tvorbě geometrie vodních toků je významný monitoring vodních toků. Vodoměrné stanice kvantitativního monitoringu, které jsou umístěny v hlásných profilech povodňové služby, slouží zároveň pro ochranu před povodněmi. 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.

Rozsah monitorovacích sítí PV tekoucích je výsledkem dlouhého vývoje. Převážná část monitorovací sítě PV je sledována od třicátých let minulého století. Monitorovací síť byla několikrát optimalizována a její současná struktura je výsledkem kompromisu mezi potřebami a finančními zdroji na její provozování. Všechny změny ve struktuře monitorovací sítě byly dělány s ohledem na minimální narušení kontinuity a homogenity pozorování, aby byla uchována možnost hodnocení dlouhodobého režimu.

V současnosti je na území ČR v provozu cca 494 stanic s hydrologickým měřením na významných vodních tocích. Rozmístění objektů kvantitativního monitoringu vodních toků v ČR je uvedeno v *tabulce 4*.

Uvažovaný přístup alternuje možnost syntézy dat LLS s daty z kvantitativního monitoringu pro tvorbu schematizace vodního toku pro hydrodynamický model. Technické řešení originálním způsobem kombinuje informace o hodnotě stanovených průtoků v době pořizování výškopisných dat metodou LLS se samotnými daty LLS.

**Tabulka 2.** Charakteristiky přesnosti DMR 4G na různém povrchu a půdním krytu (Brázdil et al., 2012a)

**Table 2.** Characteristics of DMR (Digital Model of Relief) 4G accuracy on different surfaces and soil covers (Brázdil et al., 2012a)

Kategorie povrchu a půdního krytu	Systematická chyba [m]	Úplná střední chyba [m]	Maximální chyba [m]
terénní hrany (např. u cest, silnic a železnic)	-0,25	0,34	0,77
zpevněné plochy	0,01	0,07	0,26
orná půda	0,01	0,13	0,66
louky a pastviny	0,09	0,18	0,85
křoviny, stromořadí a lesy	0,02	0,13	0,85

**Tabulka 3.** Charakteristiky přesnosti DMR 5G na různém povrchu a půdním krytu (Brázdil et al., 2012b)

**Table 3.** Characteristics of DMR 5G accuracy on different surfaces and soil covers (Brázdil et al., 2012b)

Kategorie povrchu a půdního krytu	Systematická chyba [m]	Úplná střední chyba [m]	Maximální chyba [m]
terénní hrany (např. u cest, silnic a železnic)	-0,11	0,18	0,66
zpevněné plochy	0,09	0,13	0,37
orná půda	0,07	0,14	0,56
louky a pastviny	0,03	0,21	0,42
křoviny, stromořadí a lesy	0,06	0,13	0,46

**Tabulka 4.** Monitorovací síť povrchových vod

**Table 4.** Monitoring network of surface waters

Povodí	Počet stanic měřících vodní hladinu	Počet stanic měřících průtok
Horní a střední Labe	112	112
Horní Vltava	47	47
Berounka	40	40
Dolní Vltava	40	39
Ohře a dolní Labe	49	49
Odra	61	61
Morava	75	75
Dyje	70	69
Celkem	494	492

## 2 Pilotní území

Pro potřeby zobecnění a možnosti širšího uplatnění metody syntézy dat hydrologického měření s daty z nového výškopisného mapování ČR při přípravě vstupního DMR (příčných profilů) pro potřeby hydrodynamických modelů (1D, 2D) byly vybrány lokality v Plzeňském kraji, které jsou specifikovány v *tabulce 5* a na *obr. 2*.

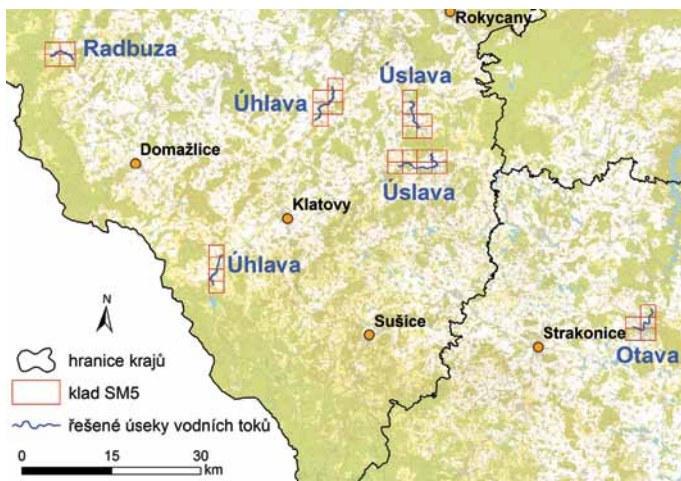
Výběr pilotních úseků vodních toků předurčoval stanovený harmonogram Českého úřadu zeměměřického a katastrálního jako garanta Projektu zpracování nového výškopisu metodou leteckého laserového skenování.

Druhým aspektem pro výběr pilotních území bylo zohlednění variability říční sítě, které vycházelo jak z hydrologických ukazatelů, tj. průtokových charakteristik vodního toku, tak z hlediska antropogenní upravenosti vodních toků (Langhammer, 2003; Maidment,

**Tabulka 5.** Charakteristiky pilotních úseků vodních toků

**Table 5.** Characteristics of the pilot sections of watercourses

IDVT (CEVT), TOK_ID	Název toku	Úsek	Délka (km)	ř. km od-do
1010001, 120020000100	Otava	Bohuslavec–Písek	7,049	20,343–27,392
1010002, 133060000100	Úslava	Srby–Novotníky	13,024	49,420–62,444
1010001, 131080000100	Radbuza	Bělá nad Radbuzou	5,948	8,890–14,838
1010002, 133060000100	Úslava	Blovice	7,319	34,330–41,649
1010002, 132140000100	Úhlava	Nýrsko	6,42	79,867–86,287
1010002, 132140000100	Úhlava	Dolní Lukavice–Přeštice–Lužany	9,253	26,000–35,253



**Obr. 2.** Pilotní úseky vodních toků  
**Fig. 2.** Pilot sections of watercourses

1993), a to i přesto, že ve většině případů přímá statistická vazba mezi úpravami toků a extremitou povodně je obtížně průkazná.

### 3 Vývoj programu CroSolver a CroSolver for ArcGIS

#### CroSolver

Program CroSolver (Cross-section Solver) je program určený pro výpočet průtočných profilů vodního toku. Program pracuje s daty získanými pomocí leteckého laserového skenování. Výstupy programu jsou textové soubory s nově vypočtenými souřadnicemi bodů celého koryta toku. Tyto výstupy mohou být dále použity v GIS aplikacích nebo hydraulických modelech.

Program CroSolver byl vytvořen jako knihovna funkcí pro programovací jazyk R (R Development Core Team, 2009). Funkce CroSolveru je možné používat buď přímo v R (offline), nebo přes online aplikaci ve webovém prohlížeči. Online aplikace pro CroSolver byla vytvořena pomocí R balíčku Shiny (RStudio, 2013).

Metodický přístup výpočtu je obdobný jako u druhého softwarového produktu CroSolver for ArcGIS, kde je detailně specifikován.

#### CroSolver for ArcGIS

Nástroj CroSolver\_ToolBox (Cross-section Solver ToolBox) pro přípravu geometrických dat na podkladě syntézy dat hydrologického měření s daty leteckého laserového skenování byl vytvořen jako nástroj ArcToolBox pro ArcGIS pomocí programovacího jazyku Python. Nástroj umožňuje preprocessing dat na základě osy vodního toku a bodů LLS. Výstupem jsou textové soubory obsahující vypočtené souřadnice veškerých bodů a hydraulických charakteristik příčných profilů a soubory ve formátu shapefile popisující oblast zhloubeného koryta (polygon), povinných spojnic příčných profilů, břehů, pat svahů a osy (polyline) a lomových bodů (point). Pro využívání nástroje postačuje mít nainstalován ArcGIS Desktop verze 10 a vyšší.

Nástroje jsou volně ke stažení na odkazu <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>. V případě CroSolver for ArcGIS jsou ve stažených datech uloženy skripty v jazyce Python (koncovka „.py“), samotný ArcToolbox (koncovka „.tbx“), který se spouští z prostředí ArcGIS, manuál k nástroji a vzorová data. Nástroj není potřeba instalovat, stačí jej buď spustit přímo z ArcCatalogu, nebo přidat do ArcToolBoxu. Nástroj CroSolver\_ToolBox v sobě zahrnuje nejen výpočet zhloubení koryta vodního toku, ale i přípravu dat pro výpočet a uložení výsledných dat do 3D shapefilů.

#### 3.1 Vstupní data

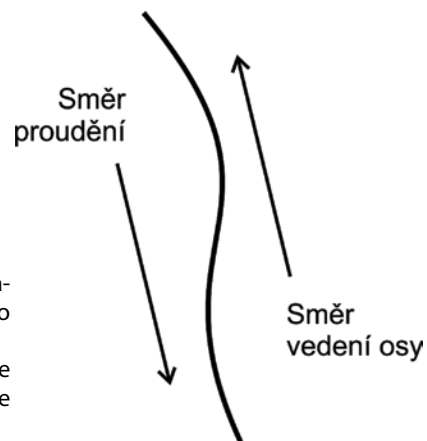
##### Osa vodního toku

Jedním ze vstupních dat pro přípravu výpočtu zhloubení je osa řešeného úseku vodního toku. Jedná se o shapefile formátu polyline. Důležité je její směřování proti

proudu toku, tj. ve směru vzrůstajícího staničení (obr. 3). Osa definuje řešený úsek a trasování vodního toku.

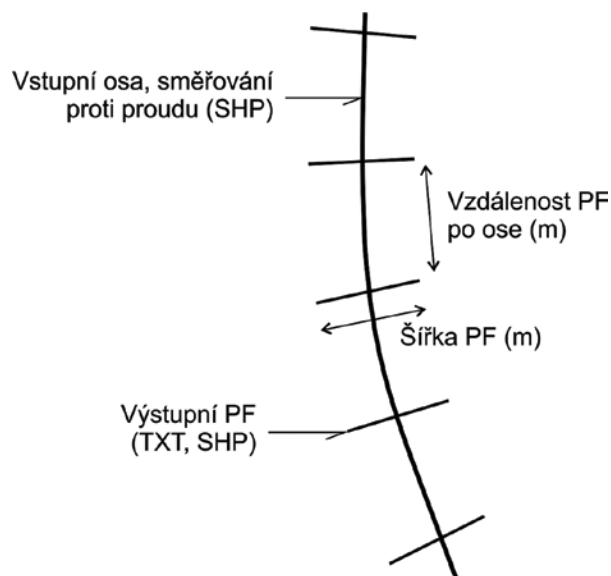
#### Digitální model reliéfu

Digitální model reliéfu (DMR) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskretních bodů v síti bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv). Body vznikly z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu. Jako vstupní data je použit textový soubor s body DMR. Data DMR musí být v textovém formátu s koncovkou „.txt“ a daty řazenými v pořadí XYZ(H). Digitální model reliéfu je ve formě použitelné pro nástroj standardně dodáván.



**Obr. 3.** Zobrazení orientace směřování osy řešeného vodního toku

**Fig. 3.** Orientation of the concerned channel centre line direction



**Obr. 4.** Zobrazení vstupních a výstupních dat nástroje

**Fig. 4.** Illustration of the input and output data of the tool

**Tabulka 6.** Popis vstupních dat a formátů nástroje „PreProc\_CreateStationLines\_TXT\_SHP“  
**Table 6.** Description of input data and formats of the “PreProc\_CreateStationLines\_TXT\_SHP” tool

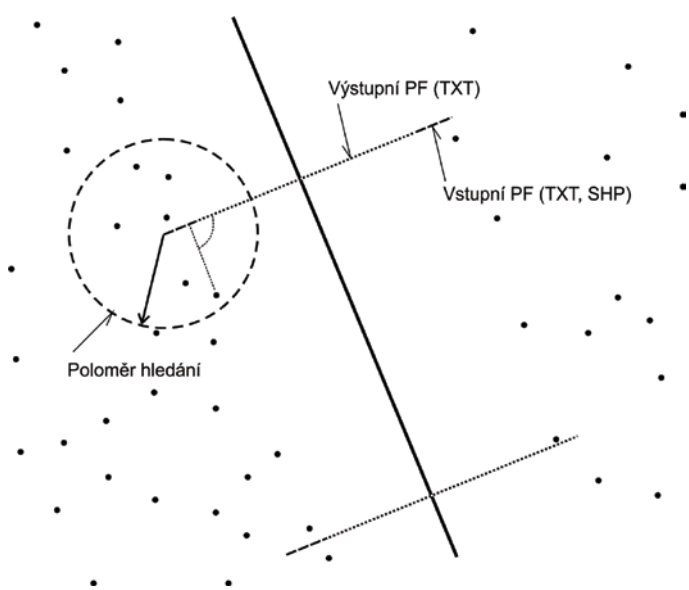
Parametr nástroje	Vstup/Výstup	Formát	Popis formátu	Popis
Vstupní osa, směřování proti proudu (SHP)	Vstup	Shapefile	.shp	Shapefile osy vodního toku vedoucí proti směru proudění, tj. ve směru staničení.
Výstupní PF (TXT, formát XrYrXlYl)	Výstup	Textový soubor	.txt	Umístění a název textového souboru, do kterého se uloží souřadnice krajních bodů (levého a pravého břehu).
Složka výstupu PF (FOLDER)	Výstup	Složka	Existující složka	Složka, do které budou uloženy příčné profily vytvořené na základě vstupních dat.
Vzdálenost PF po ose (m)	Vstup	Číslo	Desetinné číslo	Vzdálenost mezi profily v ose vodního toku v metrech.
Šířka PF (m)	Vstup	Číslo	Desetinné číslo	Celková šířka příčného profilu v metrech.



### 3.2 Metodický postup

V rámci preprocessingu jsou vytvářeny příčné profily podél osy vodního toku. Potřebné parametry pro zadání jsou vzdálenost mezi profily a šířka profilů. Vzdálenost mezi profily má vliv na podrobnost výsledků. U vodních toků s větším množstvím změn trasování či podélného sklonu se doporučuje volit vzdálenost spíše menší. Zároveň velká hustota profilů zvyšuje výpočetní čas. Koryto vodního toku je zahlubováno na základě hydrologického měření v době pořizování LLS, proto je nutné znát parametry popisující koryto vodního toku v době zaměření LLS. Nejedná se jen o průtok, ale i charakteristiku koryta vodního toku. Parametry jsou průtok, drsnostní součinitel koryta, sklony svahů, vzdálenost vyhlazení hladiny a výběr metody zahloubení.

Nástroj je možno přidat do ArcToolboxu jako balíček nástrojů, odkud může být spuštěn z produktů ESRI ArcCatalog, ArcScen či ArcMap. Nebo je možno spouštět nástroj rovnou z ArcCatalogu. Jednotlivé nástroje CroSolver umístěné v ArcToolBoxu spouštějí skripty napsané v jazyce Python.



**Obr. 5.** Zobrazení vstupních a výstupních dat nástroje s funkcí vyhledání nejnižšího bodu DMR a vrácení na kolmici k příčnému profilu  
**Fig. 5.** Illustration of the input and output data of the tool with the function of searching the lowest DMR point and returning to the cross-profile perpendicular

#### 3.2.1 PreProc\_CreateStationLines\_TXT\_SHP

První nástroj vytvoří na základě osy, vzdálenosti mezi profily a šířky profilů body levého a pravého konce profilu ve formátu .TXT a linii mezi těmito body ve formátu .SHP (Polyline) (obr. 4, tabulka 6). Tyto body slouží k následnému hledání bodů LLS.

#### 3.2.2 PreProc\_PF\_DMR\_2Dto3D

Druhý nástroj připraví vytvořené příčné profily pro výpočet zahloubení. Vytvořené příčné profily jsou pouze dvourozměrné. Krajiní body příčných profilů mají charakterizovat styk hladiny a břehu koryta. Z tohoto důvodu vychází smysl nástroje preprocessingu. Jelikož hledáme bod, který je co nejbližší hladině, tak pro něj platí, že má nejnižší výšku. Proto se do nástroje zadává poloměr hledání takového bodu. Nástroj v oblasti hledání nalezne nejnižší bod a vrátí jeho výšku a polohu na kolmici k příčnému profilu. Takto získaný bod charakterizuje bod na svahu břehu u hladiny.

Volba poloměru hledání musí být taková, aby se nestalo, že bude vybrán bod z opačného břehu. Může se tak právě dít u malých vodních toků, kde je šířka v hladině velmi malá. Z tohoto důvodu je v nástroji přidána možnost načtení buď bodů DMR jako celek, nebo bodů DMR dle břehů (PB/LB).

Pro výběr vstupního souboru popisujícího příčný profil jsou dvě možnosti, textový soubor a shapefile. Druhá možnost je k dispozici zejména pro případy, že se na řešeném úseku v určitých místech mění lokálně např. šířka koryta. Shapefile příčných profilů je možno upravit před pokračováním práce s nástrojem zahlubování koryta tak, aby příčné profily přibližně odpovídaly šířce koryta v hladině. U shapefile se však nesmí přikreslovat nové profily nebo měnit jejich posloupnost (obr. 5, tabulka 7).

#### 3.2.3 CroSolver\_3\_Computation

Výpočet zahloubení koryta vodního toku je založen na přípravných datech z preprocessingu a charakteristikách koryta vodního toku. Výpočet je proveden pro ustálené rovnoměrné proudění s využitím rovnice kontinuity a Chézyho rovnice s výpočtem Chézyho rychlostního součinitele podle Manninga.

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{R \cdot i_0} \quad (3.1)$$

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_0} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (3.4)$$

kde:  $Q$  průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )  
 $S$  plocha průtočného průřezu ( $m^2$ )

**Tabulka 7.** Popis vstupních dat a formátů nástroje „PreProc\_PF\_DMR\_2Dto3D“

**Table 7.** Description of input data and formats of the “PreProc\_PF\_DMR\_2Dto3D” tool

Parametr nástroje	Vstup/Výstup	Formát	Popis formátu	Popis
Výběr vstupního parametru (TXT/SHP)	Vstup	Výběr ze seznamu		Výběr formátu vstupního souboru z rozevíracího seznamu (TXT/SHP).
Vstupní soubor neupravených PF (TXT, formát XrYrXIYI)	Vstup	Textový soubor	.txt	Podmíněno výběrem vstupu <i>TXT</i> .
Vstupní soubor upravených PF (SHP)	Vstup	Shapefile		Podmíněno výběrem vstupu <i>SHP</i> .
Výběr typu vstupu DMR (DMR celek/ DMR dle břehu RB LB)	Vstup	Výběr ze seznamu		Výběr druhu vstupních dat DMR z rozevíracího seznamu. Výběr jednoho souboru s daty DMR, nebo data DMR pro každý břeh zvlášť.
Vstupní soubor DMR (TXT, formát XYZ)	Vstup	Textový soubor	.txt	Podmíněno výběrem vstupu <i>DMR_celek</i> . Textový soubor s body DMR obsahující informace XYZ.
Vstupní soubor DMR pravý břeh RB (TXT, formát XYZ)	Vstup	Textový soubor	.txt	Podmíněno výběrem vstupu <i>DMR_dle_brehu</i> . Textový soubor s body DMR obsahující informace XYZ pravého břehu.
Vstupní soubor DMR levý břeh LB (TXT, formát XYZ)	Vstup	Textový soubor	.txt	Podmíněno výběrem vstupu <i>DMR_dle_brehu</i> . Textový soubor s body DMR obsahující informace XYZ levého břehu.
Výstupní PF 3D, s odečtením polohy a výšky z DMR (TXT, formát XrYrZrXIYIZI)	Výstup	Textový soubor	.txt	Výstupní textový soubor se souřadnicemi a výškami levého a pravého břehu.
Poloměr hledání nejnižšího bodu (m)	Vstup	Číslo	Desetinné číslo	Poloměr hledání nejnižšího bodu z podkladu DMR.

- $v$  střední průřezová rychlost proudění ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $C$  Chézyho rychlostní součinitel ( $m^{0.5} \cdot s^{-1}$ )
- $i$  sklon hladiny (-)
- $R$  hydraulický poloměr (m)
- $n$  Manningův drsnostní součinitel (-)

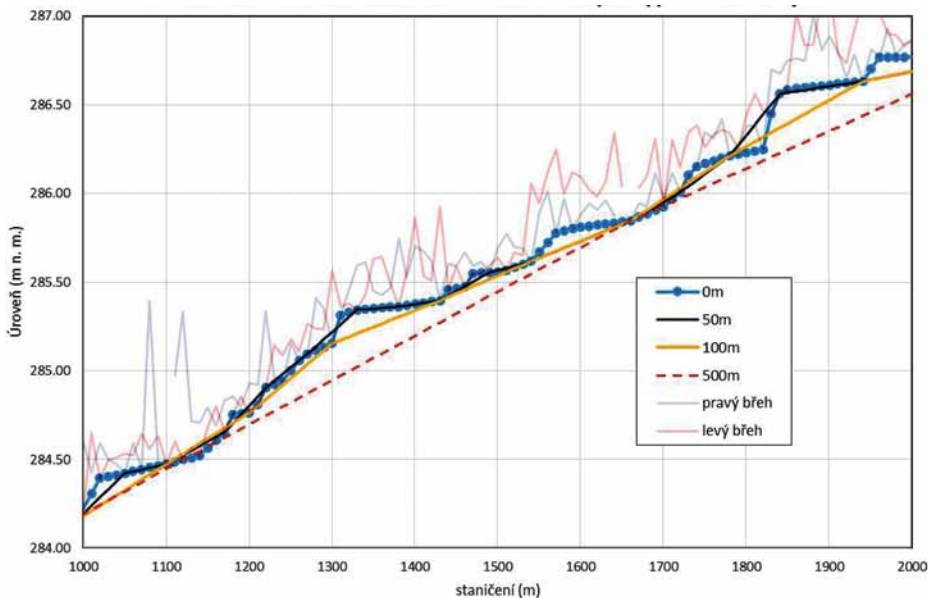
Samotný výpočet má na výběr dvě metody zahloubení a volitelný parametr pro určení sklonu hladiny. Sklon hladiny je počítán mezi sousedícími příčnými profily, kdy je vždy vybrána nižší úroveň z levého a pravého břehu (styk svahu a hladiny). Směr výpočtu je ve směru proudění. V případě, že by mezi dvěma příčnými profily byl sklon opačný, tj. vzrůstající ve směru proudění, je příčný profil pro výpočet úrovně hladiny přeskočen a následně zpětně dopočten interpolací. V případě velkého počtu příčných profilů se může stát, že bude sklon hladiny velice proměnlivý a podélný sklon hladiny bude připomínat vodní tok s velkým počtem vodních stupňů, i když je ve skutečnosti sklon v celém úseku konstantní, popř. pozvolně se měnící. V takovém případě je možno určovat minimální vzdálenost, pro kterou bude sklon hladiny dopočítáván. Pro přehlednost je na obr. 6 zobrazeno několik zvolených vzdáleností na vykresleném podélném profilu.

Výpočet zahloubení je volitelný ve dvou metodách z několika důvodů. Pro výpočet je důležitá úroveň hladiny a šířka koryta v hladině. Jelikož je úroveň levého a pravého břehu (teoretický styk břehu a hladiny) rozdílná, případně je úroveň hladiny dopočtená, dochází tak k nutnosti zahloubení úrovně u jednoho či obou bodů oproti původním úrovním břehů. Při první metodě (metoda zahloubení kolmo) je zahloubení provedeno kolmo a polohové umístění nově vzniklých břehů a šířky v hladině se nemění. V druhé metodě (metoda zahloubení dle sklonu) je zahloubení k výchozí hladině provedeno na základě sklonů břehů koryta. Zahloubením hladiny se změní souřadnice břehů, a tím i šířka v hladině. Porovnání metod je znázorněno na obr. 7.

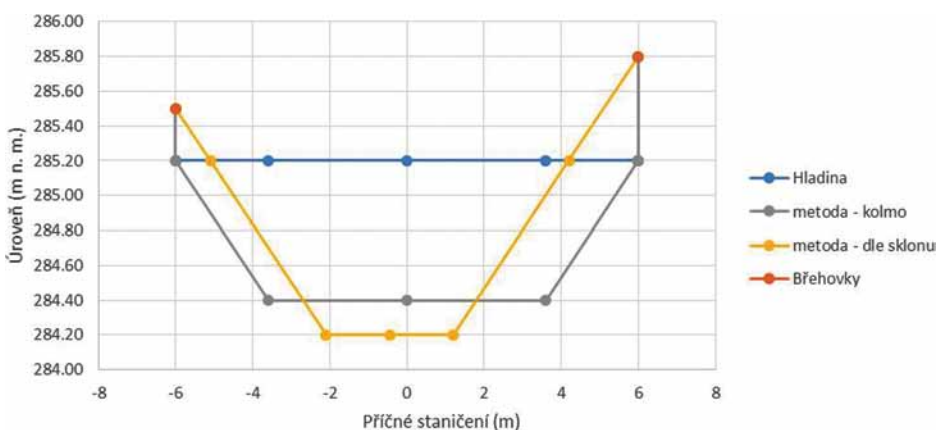
Pro případ, kdy dojde k záporné šířce ve dně při hledání průtočné plochy, je nastavena změna příčného sklonu svahů na dvojnásobek zadané hodnoty. Pokud i nadále vychází záporná hodnota, výsledné lichoběžníkové koryto má sklony svahů 1 000 : 1.

## Výsledky

Výsledek nástroje zahloubení je v podobě textového souboru a shapefilů. Textový soubor obsahuje souřadnice všech dopočítaných poloh a výšek bodů a hydraulické charakteristiky v příčných profilech. Výsledné shapefiley jsou ve třech geometriích – body, polyline, polygon. Body jsou ve všech lomových bodech příčných profilů. Polyline tvoří povinné spojnice mezi body a vytvářejí kresbu příčných profilů, osy dna koryta, pat svahů a břehů (obr. 8, 9). Polygon vytváří obalovou křivku zahloubeného koryta. Body a linie obsahují atributy o typu (Breh\_pravy, Breh\_levy, Pata\_prava, Pata\_leva, Osa, PF) a staničení, které může posloužit jako identifikátor pro spárování záznamu shapefilu a textového výstupu.



**Obr. 6.** Znázornění volitelné minimální vzdálenosti při výpočtu hladiny  
**Fig. 6.** Illustration of the optional minimum distance in water level calculation



**Obr. 7.** Porovnání dvou metod výpočtu zahloubení (zobrazeno na příčném řezu)  
**Fig. 7.** Comparison of the two methods of recess calculation (illustrated on cross-section)

**Tabulka 8.** Popis vstupních dat a formátů nástroje „Computation“  
**Table 8.** Description of input data and formats of the “Computation” tool

Parametr nástroje	Vstup/Výstup	Formát	Popis formátu	Popis
Vstupní soubor (TXT, formát XrYrZrXYZ)	Vstup	Textový soubor	.txt	Textový soubor s body břehů obsahující informace XYZ pro levý a pravý břeh.
Výstupní soubor (TXT)	Výstup	Textový soubor	.txt	Umístění a název textového souboru, do kterého se uloží výsledné hodnoty souřadnic a hydraulických charakteristik.
Složka uložení výstupních shapefilů (FOLDER)	Výstup	Složka	Existující složka	Složka, do které budou uloženy výsledné soubory shapefile.
Metoda výpočtu zahloubení (kolmo/dle sklonu)	Vstup	Výběr ze seznamu		Výběr metody výpočtu zahloubení z rozevřacího seznamu (kolmo/dle sklonu).
Průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	Vstup	Číslo	Desetinné číslo ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	Hodnota průtoku v době pořízení LLS.
Drsnostní součinitel podle Manninga	Vstup	Číslo	Desetinné číslo	Manningův drsnostní součinitel koryta vodního toku v zájmovém úseku.
Sklon svahu příčného profilu (m/m)	Vstup	Číslo	Desetinné číslo (bezrozměrné číslo)	Příčný sklon svahů lichoběžníkového koryta v bezrozměrném čísle.
Minimální vzdálenost pro výpočet hladiny (m)	Výstup	Číslo	Desetinné číslo (metry)	Minimální vzdálenost pro výpočet úrovně a sklonu hladiny. Výchozí hodnota 0.

## Diskuse

Uvažované metodické postupy přípravy vstupního DMR (příčných profilů) pro potřeby hydrodynamických modelů (1D, 2D) při modelování povodňových scénářů, implementované do vývoje softwarových nástrojů CroSolver a CroSolver for ArcGIS, vyžadují objektivní posouzení nejistot, které jsou s danými přístupy spojeny.

Jedná se i o základní myšlenku využití kvantitativního monitoringu pro zhlubování DMR z dat LLS. Eliminace dané nejistoty je zajištěna vysokou četností monitorovacích stanic Českého hydrometeorologického ústavu a podniků Povodí. Monitorovací síť poskytuje s ohledem na lokalizaci jednotlivých vodoměrných stanic především na významných vodních tocích vhodný potenciál pro samotné využití při konečné tvorbě DMR, a to právě na významných vodních tocích. V otázce drobných vodních toků je předpokládáno využití hydrologické analogie, která je předmětem navazujících analýz (otázkou ovšem je, zda by byla výrazná chyba určení stanoveného průtoku v době skenování např. z  $5 \text{ m}^3$  na  $7 \text{ m}^3$  v situaci, kdy N-letý průtok  $Q_{100}$  je  $357 \text{ m}^3$ ). Zda je ještě nutné určovat průtok v době skenování a provádět zhlubování, či nikoliv, je nutné zohlednit deklarovanou přesností dat z LLS, které mohou být využity samostatně v případě malých vodních toků s průtokem vody o malé hloubce, kde již nebude nutná kombinace s geodetickým zaměřením, či kombinovat data z LLS s hydrologickými měřeními průtoků. V daném případě totiž dojde k odrazu laserového paprsku od samotného dna koryta, respektive při tvorbě vstupního DMR bude zaznamenána úroveň břehu oproti dnu představovat tak nízkou hodnotu, že bude pro samotnou modelaci zanedbatelná. Další otázkou však stále zůstává, jak vhodně provést selekci a zahrnout vodní tok do kategorie, kdy je nutné provést zhloubení, či do kategorie, kdy stačí využít samotných dat LLS.

Hrádek a Sobota (1999) uvádějí, že státní monitorovací síť povrchových vod je tvořena vodoměrnými stanicemi situovanými převážně na významných vodních tocích. V podmínkách ČR zaujímají významné vodní toky 22 % celkové délky hydrografické sítě. Přestože tak větší část hydrografické sítě ČR (78 % celkové délky) představují drobné vodní toky, jsou pro ně jen výjimečně k dispozici soustavná hydrologická pozorování. Tato skutečnost není ovšem s ohledem na možnost uplatnění hypotézy o syntéze dat LLS s daty z hydrologického měření pro tvorbu výpočetní geometrie limitující, poněvadž struktura této sítě pokrývá významné vodní toky a jejich povodí tak, aby za pomoci hydrologické analogie (Plate, 2002; Giannoni et al., 2003; Fowler, 2005) umožňovala zpracování hydrologických charakteristik pro libovolné místo v říční síti.

Ve vazbě na vysokou objemovou kapacitu dat se jako řešení nabízí vhodně redukovat použitý TIN a to tak, aby nedošlo ke snížení objemu dat na úkor zaznamenaného detailu morfologie terénu, a tím i ke snížení přesnosti a jistoty povodňových modelů.

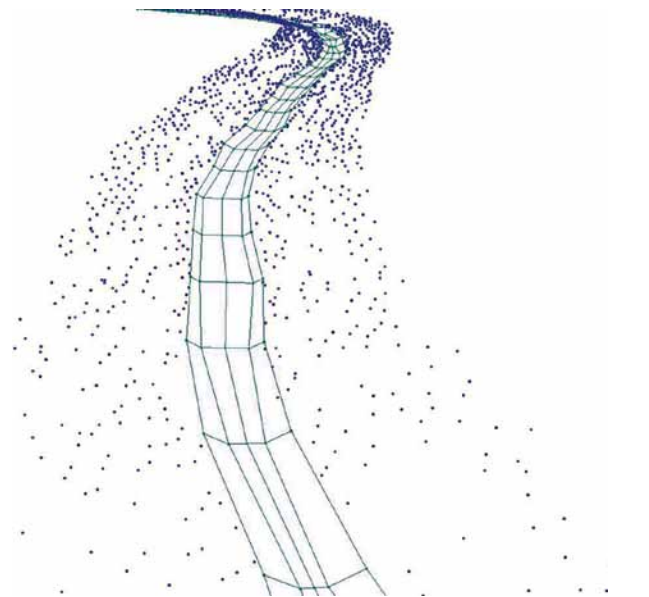
Odvození sklonu a šířky hladiny vychází ze záznamu laserového skenování, zde je v případě poslední 5. generace digitálního modelu reliéfu standardní odchylka H-souřadnice  $0,18 \text{ m}$ . Shodná i vyšší odchylka je však standardně užívána i při zpracování výškopisu v inundaci, kde je tento podklad v hydrodynamických modelech běžně využíván. Navíc při verifikaci vygenerovaných příčných profilů z podkladu připraveného na základě syntézy dat LLS s daty z hydrologického měření bylo dosaženo adekvátní shody, která je v příspěvku demonstrována.

Rovněž s ohledem na případnou nejistotu v případě určení sklonu hladiny je nutné zohlednit skutečnost, že samotná nejistota se pohybuje řádově jinde s ohledem na scénáře, pro které je geometrie vytvářena.

Již v současnosti probíhá rozšíření volby přednastavených tvarů koryt o další podoby, které se budou více blížit přirozeným korytům. V návrhu příspěvku je tato skutečnost nyní rovněž popsána a je uvedeno, že pro potřeby uvedené studie je dosaženo požadované geometrie koryta vodního toku, jehož kapacita je shodná s hodnotou průtoku v přirozeném korytě.

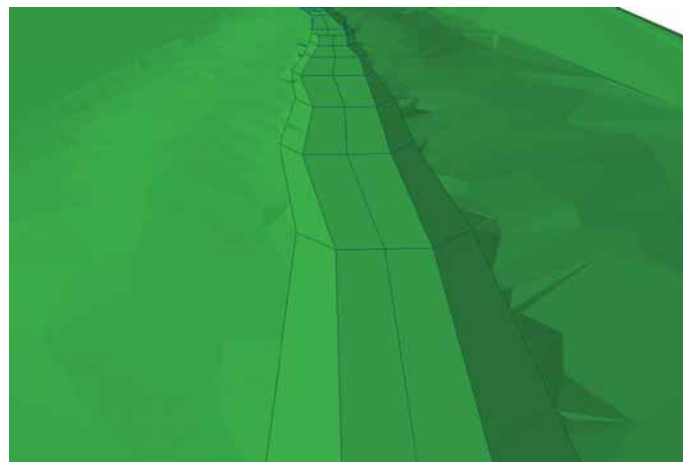
Stanovení parametru  $m$  určujícího sklon svahů profilu (u lichoběžníkového profilu) vychází z průběhu zaznamenaného profilu v bezprostřední blízkosti hladiny vody. Metodou LLS je zaznamenána část příčného profilu samotného koryta vodního toku, která slouží jako podklad pro určení parametru  $m$ .

Stanovení Manningova součinitele drsnosti  $n$  vycházelo ze znalosti drsnosti koryta na základě podrobného místního šetření, které je



**Obr. 8.** Ukázka bodů DMR (LLS) a povinných spojnic zhloubeného koryta (břehové linie, paty svahů, osa, příčné profily)

**Fig. 8.** Illustration of DMR points (ALS) and obligatory connecting lines of the recessed channel (riverbank lines, slope bases, stream centre line, cross-profiles)



**Obr. 9.** DMT ve formátu TIN se zpracovaným zhloubeným korytem  
**Fig. 9.** Digital Model of Terrain (DMT) in the TIN format with the incorporated recessed channel

standardně prováděno i při tvorbě samotných hydrodynamických modelů. S ohledem na možný vliv Manningova drsnostního součinitele byla provedena citlivostní analýza vlivu drsnostního součinitele  $n$  na hodnotu stanoveného průtoku. Pro bližší definici vlivu drsnostního součinitele bylo provedeno další srovnání s ohledem na verifikaci s geodeticky zaměřenými příčnými profily, kdy ze získaných výsledků vyplývá, že metoda je dostatečně subtilní pro využití v praxi.

Přesnost popsaného způsobu tvorby geometrie do hydrodynamického modelu je závislá na deklarované chybě výšky  $0,18 \text{ m}$ . S rozvojem technologií pro snímání zemského povrchu bude zákonitě docházet i ke snižování této uvedené chyby. Tím se bude automaticky zvyšovat i přesnost uvedeného způsobu tvorby geometrie a také možnosti širšího rozšíření v praxi. Dosavadní výsledky z prováděných analýz ovšem nasvědčují tomu, že deklarovaná chyba výšky  $0,18 \text{ m}$  bude dodržena (Brázdil et al., 2010).

Volba využití Chézyho rovnice pro daný případ byla cílená, v dalším studiu je plánována možnost alternovat řadu jiných metod, které jsou v současnosti k dispozici. Například pro proudění složenými profily probíhají neustále pokusy na vylepšení stávajících metod výpočtu používaných v jednorozměrných modelech, popř. zavádění metod nových. Variantou je i použití metod označovaných jako 1,5D nebo 1D+ (jako je Lateral Distribution Method) či metody Divided Channel Method, Ackersova empirická metoda, James and Wark Method.



Náročnost na vstupní data se přitom prakticky nemění, přičemž výpočetní náročnost stoupá jen minimálně.

Rovněž je možné testovat po zobecnění základního principu zahrnutí výpočtu nerovnoměrného proudění v 1D schematizaci s ohledem na omezenou platnost rovnoměrného proudění u přirozených koryt. Zde je však nutno připomenout, že subjektivní hodnocení zpracovatele v podobě například odhadu charakteru proudění je dalším zdrojem nejistoty hydraulického výpočtu.

Při existenci objektů na vodních tocích v podobě mostků, propustků, jezů, stupňů, skluzů atd. jsou přítomné objekty komplikací, která je v současnosti řešena. Přítomnost objektů na toku ovšem neznamená, že by byla metoda v případě jejich přítomnosti vždy automaticky nepoužitelná. V současnosti je tato problematika řešena v několika alternativách. Identifikace příčných překážek je možná na základě samotného využití dat LLS (Uhlířová a Zbořil, 2009) či na základě terénní rekognoskace. Navíc pro následnou tvorbu hydrodynamického modelu bude stejně nutné tyto objekty geodeticky zaměřit.

Pro využití syntézy dat LLS s daty z hydrologického měření je však možné využít (a to s jistotou u pevných jezů, stupňů atd. či u pohyblivých jezů se znalostí základních výškových parametrů) identifikovaných objektů. Od objektu např. pevného jezu bude stanovena vzdutá hladina, tj. bude identifikována plocha jezové zdrže. V rámci této plochy bude interpolačně doložitelný příčný profil koryta v úseku od jezu k prvnímu profilu, který není ovlivněn jezovou zdrží. Přestože nebude zcela přesně vystižena reálná podoba příčného profilu vodního toku v daném úseku, nebude mít tato skutečnost vliv na samotnou tvorbu hydrodynamického modelu, poněvadž se v jezové zdrži jedná o „mrtvý“ prostor, který se nepodílí na transformaci povodňové vlny.

## Závěr

Cílem příspěvku bylo popsat alternativní přístup přípravy vstupních výškopisných podkladů pro hydrodynamické modely. Metoda je založena na syntéze dat leteckého laserového skenování s daty z hydrologického měření (informace o aktuálním průtoku v řešeném toku v době snímání).

Pro kvantifikaci nejistot jednotlivých vstupních veličin byly zpracovány citlivostní analýzy deklarující vliv jednotlivých parametrů na spolehlivost určené hledané hloubky koryta. Výsledky dosažené ze zpracovaných citlivostních analýz pro uvedené vstupní veličiny vypovídají, že uváděná metoda je dosti subtilní pro aplikaci při povodňových scénářích. Zpracování detailní citlivostní analýzy pro všechny vstupní veličiny bude předmětem dalšího řešení. V daném případě bylo pro verifikaci modelu využito samotných geodetických údajů.

Výhodou daného přístupu je, že popisovaná metoda pro automatickou tvorbu geometrie vodních toků s využitím LLS v kombinaci s informací o aktuálním průtoku v daném toku je ve vazbě na využívání laserového skenování ve světě lehce aplikovatelná i za hranicemi ČR. Skenované rozsáhlé lokality např. v Bavorsku, Francii atd., kde skenování proběhlo s daleko vyšší hustotou bodů na m<sup>2</sup>, než je v současnosti realizováno pro celou ČR, dávají předpoklad, že metoda syntézy by se tak mohla stát významnou i s ohledem na světovou vědu.

Autoři si rovněž samozřejmě uvědomují, že přesnost popsaného způsobu tvorby geometrie do hydrodynamického modelu je závislá na deklarované chybě výšky 0,18 m. S rozvojem technologií pro snímání zemského povrchu bude zákonitě docházet i ke snižování této chyby. Tím se bude automaticky zvyšovat i přesnost uvedeného způsobu tvorby geometrie a také možnosti širšího rozšíření v praxi.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR, projektu číslo TA02020139 „Využití hydrologického měření při schematizaci koryt vodních toků pro potřeby hydrodynamických modelů na podkladě dat leteckého laserového skenování“.

## Literatura

Alho, P. and Makinen, J. (2010) Hydraulic parameter estimations of a 2D model validated with sedimentological findings in the point bar environment. *Hydrological processes*, 24 (18), 2578–2593.

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

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

Brázdil, K. aj. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace. Zeměměřický úřad, Vojský geografický a hydrometeorologický úřad, říjen 2010.

Brázdil, K. aj. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace. Zeměměřický úřad, Vojský geografický a hydrometeorologický úřad, leden 2012.

Brázdil, K. aj. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace. Zeměměřický úřad, Vojský geografický a hydrometeorologický úřad, leden 2012.

Cobby, D.M., Mason, D.C., and Davenport, I.J. (2001) Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, 121–138.

Cobby, D.M., Mason, D.C., Horritt, M.S., and Bates, P.D. (2003) Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser. *Hydrological Processes*, vol. 17, No. 10, 1979–2000. Available from: 10.1002/hyp.1201.

Cook, A. and Merwade, V.M. (2009) Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, vol. 377, is. 1–2, 131–142.

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

Drbal, K. aj. (2009) Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Ministerstvo životního prostředí.

Dušánek, P. Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. In: workshop září 2010.

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, Ph.D.

Elberink, S. and Mass, H.G. (2000) The Use of Anisotropic Height Texture Measures for the Segmentation of Airborne Laser Scanner Data. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, Part B3.

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

Flood, M. and Gutelius, B. (1997) Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.*, 63 (4), 327–366.

Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D. (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Assessment of control climate. *Journal of Hydrology*, 300 (2005), 212–233.

Giannoni, F., Smith, J.A., Zhang, Y., and Roth, G. (2003) Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates. *Advances in Water Resources*, 26 (2), 195–203.

Guenther, G.C., Brooks, M.W., and Larocque, P.E. (2000) New capabilities of the “SHOALS” airborne LiDAR bathymeter. *Rem. Sens. Environ.*, 73 (2), 247–255.

Hrádek, F. a Sobota, J. Prognózy maximálních průtoků v nepozorovaných profilech povodí drobných vodních toků. In: *Workshop Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha, ČVUT, ČVHS, 25. 10. 1999, s. 82–85. ISBN 80-01-02072-X.

Langhammer, J. (2003) Anthropogenic Transformation of river network in the Otava River Basin. *AUC Geographica*, 38 (2), 139–156.

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

Maidment, D.R. (ed.) (1993) *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

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

Mass, H.G. and Vosselman, G. (1999) Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 153–163.

Merwade, V.M., Cook, A., and Coonrod, J. (2008) GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1300–1311.

Merwade, V.M., Maidment D.R., and Goff, J.A. (2006) Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, 331, 731–741.

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

Pavličková, L., Novák, P., Roub, R. a Hejduk, T. (2012) Využití geografických informačních systémů a územně plánovací dokumentace při modelování povodňového rizika. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 54 (4), s. 1–6, ISSN 0322–8916, příloha *Vodního hospodářství* č. 8/2012.

- Plate, E.J. (2002) Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267, 2–11.
- Ramsankaran, R., Maerker, CH., and Malcherek, A. (2010) Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport processes during storm events in a non-perennial river. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (1), 36–48, ISSN 0042-790X.
- R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2009. Dostupné z: <http://www.R-project.org>. ISBN 3-900051-07-0.
- RStudio { Inc. shiny: Web Application Framework for R, 2013. Dostupné z: <http://CRAN.R-project.org/package=shiny>. R package version 0.8.0.
- Ritchie, J.C. (1996) Remote sensing applications to hydrology: airborne laser altimeters. *Hydro. Sci. J.*, 41 (4), 625–636.
- Roub, R., Hejduk, T. a Novák, P. (2012a) Využití dat z tvorby nového výškopisu území České republiky metodou leteckého laserového skenování při analýze a mapování povodňových rizik. *Geodetický a kartografický obzor*, roč. 58/100, č. 1, ISSN 0016-7096.
- Roub, R., Hejduk, T., and Novák, P. (2012b) Automating the creation of channel cross section data from aerial laser scanning and hydrological surveying for modeling flood events. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60 (4), ISSN 0042-790X.
- Šíma, J. (2009) Abeceda leteckého laserového skenování. *Geobusiness*, č. 3.
- Uhlířová, K. a Zbořil, A. (2009) Možnosti využití laserového snímání povrchu pro vodohospodářské účely. *Vodní hospodářství*, 59 (12), s. 11–15.
- Valentová, J., Valenta, P., and Weyskrabová, L. (2010) Assessing the retention capacity of a floodplain using a 2D numerical model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58 (4), 221–232, ISSN 0042-790X.
- Valenta, P. (2005) Využití numerických modelů proudění vody v protipovodňové ochraně. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

Ing. Radek Roub, Ph.D.<sup>1)</sup>, Ing. Filip Urban<sup>2,3)</sup>,  
Ing. Vojtěch Havlíček, Ph.D.<sup>1)</sup>, RNDr. Pavel Novák<sup>1,4)</sup>,  
Ing. Tomáš Hejduk<sup>1,4)</sup>, Ing. Luděk Bureš<sup>1)</sup>, Adam Reil<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ČZU, Fakulta životního prostředí

<sup>2)</sup> Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a.s.

<sup>3)</sup> ČVUT, Fakulta stavební

<sup>4)</sup> Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

e-mail: [roub@fzp.czu.cz](mailto:roub@fzp.czu.cz)

Příspěvek prošel lektorským řízením.

## Keywords

aerial laser scanning (ALS) – hydrological measurement – cross-profile – hydrodynamic model – GIS – floods

*Development of software tools CroSolver and CroSolver for ArcGIS for the preparation of a computer track for hydrodynamic models (Roub, R.; Urban, F.; Havlíček, V.; Novak, P.; Hejduk, T.; Bures, L.; Reil, A.)*

**In the territory of the Czech Republic, flood situations represent one of the most material threats of natural disasters. The significance of these threats grows due to the increasingly extreme character of weather observed in recent years. The fact follows from the geographical location of the Czech Republic on both continental and global scales. From the perspective of the elimination of potential risks and consequences of such events themselves, very important appear to be warnings provided by the forecasting flood service about the character and size of inundation areas for individual N-year flood discharges and specific flood scenarios. An adequate image of depths and flow rates in the longitudinal sections or cross sections of streams during a flood event can be obtained through hydrodynamic models. Thus, the information obtained from the hydrodynamic models has a privileged position in the protection of people's lives and mitigation of damages on property.**

**Decisive for harvesting relevant outputs from the hydrodynamic models are input data. Since the cost of gaining relevant data on the morphology of streambed and adjacent inundation area is high, an approach is presented, which is based on the synthesis of data from hydrological measurements and aerial laser scanning data, which attempts at substituting the costly geodetic surveying of streambeds. The considered approach employs aerial laser scanning of the watercourse first, together with the determination of discharge achieved at the time of the aerial laser scanning (ALS). The ALS measurement does not make it possible to include the channel part under the stream water level; however, it allows establishing the water level position. Subsequently, water-level slope is calculated between the selected cross-profiles, and providing that the cross-profile type (three basic types considered at present include rectangle, trapezium and parabola) and the flow rate are known, the channel depth can be calculated by using Chézy's equation.**

**The paper presents results from the development of two software tools, which serve for the preparation of a computer track for hydrodynamic models (CroSolver and CroSolver for ArcGIS) and some partial research results.**

## VYBRANÉ NEZÁKONNÉ DROGY V ODPADNÍCH VODÁCH

Věra Očenášková, Danica Pospíchalová, Alena Svobodová, Petra Kolářová, Petr Tušil

## Klíčová slova

epidemiologie odpadních vod – nezákonné drogy – metamfetamin – amfetamin – MDMA – kokain

## Souhrn

**Hlavním cílem projektu „Stanovení nezákonných drog a jejich metabolitů v komunálních odpadních vodách – nový nástroj pro doplnění údajů o spotřebě drog v České republice“ je získat novou sadu objektivních dat o spotřebě nezákonných drog v České republice. V průběhu roku 2013 bylo analyzováno téměř 1 000 vzorků surových odpadních vod v 11 lokalitách. Nezákonné drogy byly nalezeny ve všech analyzovaných vzorcích. Koncentrace metamfetaminu v některých případech byly vyšší než 10 000 ng/l, nálezy amfetaminu se pohybovaly mezi 2 ng/l a 1 500 ng/l, MDMA – extáze byla nalezena v koncentracích v rozmezí 0,1 až 534 ng/l. Nálezy benzoylkegoninu, hlavního metabolitu kokainu, ze kterého se při výpočtech vychází, byly v intervalu 0 až 850 ng/l. Projekt stále pokračuje, počet sledovaných lokalit byl rozšířen tak, aby byla pokryta celá Česká republika.**

## Úvod

Drogy provázejí lidstvo od nepaměti. Již v neolitické době byly na území Mezopotámie známy účinky makové šťávy, ve starém Egyptě (14. stol. př. n. l.) se z máku vyráběl božský lék na bolest. Jednou z nejstarších kulturních rostlin lidstva je konopí, které bylo využíváno jak k léčebným účelům, tak v duchovní sféře např. v Číně a Indii již před naším letopočtem. Účinky listů keře koky (obsahují kokain) znali jihoameričtí Indiáni již před 5 000 lety.

K masovému rozšíření drog dochází až v 19. století, kdy se velmi intenzivně začíná rozvíjet chemický a farmaceutický průmysl, účinné látky byly z rostlin izolovány a vzápětí se začínají vyrábět i syntetickou cestou. Velmi často jsou nejprve součástí léčiv – např. heroin byl uveden na trh v roce 1898 firmou Bayer jako prostředek proti kašli a k uklidnění. Nový způsob aplikace drog přináší i vynález moderní injekční stříkačky v roce 1853.

To vše přináší nárůst drogových závislostí se všemi společenskými komplikacemi a dopady jak zdravotními, tak sociálními. Na přelomu 19. a 20. století začínají probíhat mezinárodní jednání o narkotikách a postupně vznikají v jednotlivých zemích protidrogové zákony. Začátkem 20. století jsou také drogy rozděleny na legální (alkohol a nikotin) a na nelegální (např. kokain, heroin a konopí).

Konec 20. a začátek 21. století přinesl významný rozvoj analytických metod používaných v chemii a stále dokonalejší přístrojové vybavení umožňuje stanovovat nejrůznější sloučeniny i při velmi nízkých koncentracích (subnanogramová množství) v jakékoliv matrici. Tyto metody umožnily také identifikovat nelegální drogy a jejich hlavní metabolity vyloučené především močí do odpadních vod.



## Epidemiologie odpadních vod

Daughton a Ternes [1] v roce 1999 a Daughton [2] v roce 2001 vyslovili hypotézu, že z výsledků sledování koncentrací nezákonných drog v komunálních odpadních vodách lze pomocí zpětného výpočtu odhadovat spotřebu drog ve sledované oblasti. Touto hypotézou byl položen základ tzv. „sewage epidemiology“ – tedy epidemiologie odpadních vod – kterou poprvé v praxi použili Zuttato et al. [3] v zájmové oblasti povodí řeky Pádu a některých jezer v Itálii a Švýcarsku. Výsledky ukázaly překvapivá zjištění a vedly k dalšímu vývoji postupů a výzkumu v této oblasti sledování spotřeby drog v populaci.

Nezákonné drogy a jejich metabolity se po vyloučení z organismu stávají součástí komunálních odpadních vod, dostávají se na ČOV, kde se některé z nich odstraňují lépe, některé hůře. Jako součást vyčištěných odpadních vod vytékají do vod povrchových. Publikací o nálezích nezákonných drog v komunálních odpadních vodách je již celá řada, příkladem může být studie, která srovnávala spotřebu drog v 19 evropských městech [4]. Tato studie vycházela z kampaně v r. 2011, která měla za cíl sjednotit analytické postupy pro stanovení drog a jejich metabolitů v odpadních vodách. Využití analýzy odpadních vod pro zjištění spotřeby drog v Austrálii popisují Irvin et al. [5]. Sledováním drog v odpadních vodách v Paříži se zabývá Karolak et al. [6]. Množství drog v nátoku a odtoku 25 ČOV na území Francie a mapu spotřeby drog uvádí Nefau et al. [7]. Jednu z prvních informací o množství drog v odpadních vodách v České republice publikoval v roce 2012 Baker et al. [8].

Informací o nezákonných drogách v pitných vodách je zatím poměrně málo. Nálezy drog v povrchových a pitných vodách v povodí řeky Tajo uvádějí Valcárcel et al. [9]. V roce 2006 se výskytem některých psychoaktivních drog v povrchových, odpadních a pitných vodách zabýval Hummel et al. [10].

Cílem projektu „Stanovení nezákonných drog a jejich metabolitů v komunálních odpadních vodách – nový nástroj pro doplnění údajů o spotřebě drog v České republice“ se zkráceným názvem DRAGON, který je řešen v rámci Programu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v.v.i., je aplikovat metodu a postupy tzv. „sewage epidemiology“ (epidemiologie odpadních vod) v podmínkách České republiky, zmapovat vybrané městské aglomerace z pohledu spotřeby drog pomocí analýzy odpadních vod v nátocích na městské čistírny odpadních vod a zpracovat metodický postup pro odhad spotřeby drog v těchto aglomeracích.

## Metody a postupy

Jako modelové aglomerace byla vybrána města Praha, Brno, Ostrava, Plzeň a Ústí nad Labem. Kromě těchto velkých měst byly dále sledovány Frýdek-Místek, Český Těšín, Havířov, Karviná a Orlová (sledování v roce 2013), v roce 2014 přibýly další lokality – Opava, Nový Jičín, Cheb, Aš, Mariánské Lázně, Františkovy Lázně, Karlovy Vary, Liberec, Jablonec, Pardubice, Hradec Králové, Jihlava, Zlín, Olomouc, Bruntál a České Budějovice. V tomto příspěvku budou porovnány některé výsledky z odběrových kampaní, které proběhly v roce 2013.

V tabulce 1 jsou uvedeny základní charakteristiky některých městských aglomerací (počet odkanalizovaných obyvatel) a příslušných ČOV (objem nátoků na ČOV/den).

**Tabulka 1.** Přehled vybraných městských aglomerací a ČOV  
**Table 1.** Overview of selected conurbations and WWTP

Aglomerace	Počet obyvatel	Průměrný denní průtok (m <sup>3</sup> /den) 2010	Průměrný průtok (m <sup>3</sup> /s) 2010
Praha	1 241 664	518 400	6,00
Brno	378 965	168 548	1,95
Ostrava	305 998	138 238	1,60
Ústí nad Labem	94 258	36 986	0,43
Plzeň	167 302	71 233	0,82
Karviná	58 833	20 000	0,23
Český Těšín	25 154	10 959	0,12
Havířov	78 713	21 600	0,25
Orlová	30 988	8 022	0,09
Frýdek-Místek	57 747	32 877	0,38



**Obr. 1.** Monitorovací místa na kanalizační síti města Ostravy

**Fig. 1.** Monitoring sites on the sewerage system in Ostrava

Zdroj: OVaK, a.s., VÚV TGM, v.v.i., ACCENDO, o.p.s.

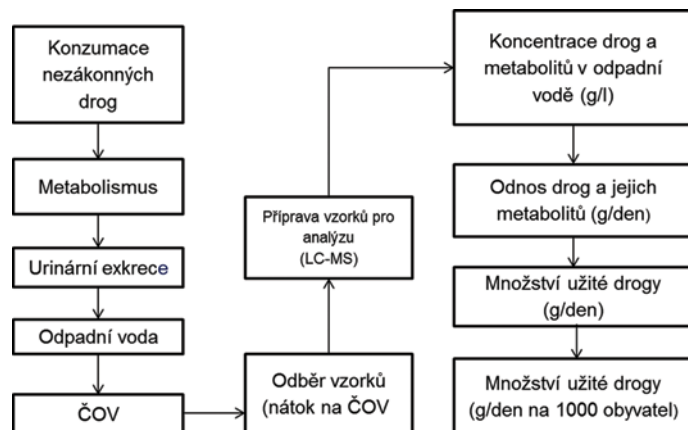
V každé z uvedených lokalit byla vybrána vzorkovací místa podle možností dané kanalizační sítí. Ve většině měst šlo o nátoky na ČOV, v některých aglomeracích byla vzorkovací místa i v uzlových bodech kanalizační sítě – příklad je uveden na obr. 1.

V roce 2013 byly ve sledovaných lokalitách realizovány čtyři sedmi-denní odběrové kampaně (duben, červen, přelom srpna a září a říjen). Vzorky byly odebírány pomocí automatických odběrových zařízení jako 24hodinové slévané vzorky odebírané v časových intervalech 1–2 hodiny. Odebrané vzorky surových komunálních vod byly podle možností laboratoře buď ihned zpracovány, nebo bezprostředně po odběru zamrazeny a do zpracování uchovávány při teplotě -20 °C. Před vlastní analýzou jsou vzorky přefiltrovány a zpracovány metodou on-line SPE – LC-MS/MS. Za základ byla vzata analytická metoda, kterou publikovali v roce 2008 Postigo et al. [11].

V komunálních odpadních vodách v nátocích na jednotlivé ČOV a v uzlových bodech kanalizačních sítí vybraných městských aglomerací byly sledovány následující drogy a jejich metabolity:

- 3,4-methylendioxyamfetamin (MDMA – extáze)
- Amfetamin (AM)
- Metamfetamin (MAMP – pervitin)
- Kokain (CO)
- Benzoylkegonin (BE)
- Cocathylen (CE)
- Heroin (HER)
- Morfin (MOR)

Schematický přehled epidemiologického přístupu k odhadu spotřeby ve sledovaných aglomeracích, popř. i v celé České republice je na obr. 2.



**Obr. 2.** Schéma principu výpočtu spotřeby drog v populaci pomocí metody – „sewage epidemiology“

**Fig. 2.** Schematic overview of the sewage epidemiology approach



Odhad celkové spotřeby vyplývá ze vztahu:

$$\text{spotřeba (g/den)} = M \text{ (ng/l)} \times \text{průtok (l/den)} \times \text{PF},$$

kde: **spotřeba** = denní spotřeba zvolené drogy;  
**M** = koncentrace látky (metabolitu dané drogy, popř. drogy nezměněné), ze které výpočet vychází; stanovené ve vzorku odebraném na nátoku na ČOV,  
**průtok** = průtok odpadní vody ČOV za den v místě odběru;  
**PF** = přepočítávací nebo korekční faktor, který se stanoví jako poměr molekulárních hmotností zvolené drogy a specifické látky (metabolitu nebo nezměněné drogy) násobený průměrnou procentuální metabolizací drogy na zvolený metabolit, popř. nemetabolizací – prochází-li droga tělem částečně nezměněna.

Tyto výpočty mohou být ovlivněny celou řadou faktorů: procentuální složení metabolitů jednotlivých drog má poměrně široké rozmezí, liší se u jednotlivých osob (např. v závislosti na pH moči), některé látky mohou metabolizovat na stejné metabolity (např. metamfetamin metabolizuje ze 7 % na amfetamin, metabolity některých farmakologických přípravků se shodují s amfetaminem). Pokud se jako základ pro kalkulace volí nezměněné drogy, není jisté, zda tyto drogy byly použity nebo přímo zlikvidovány. Všechny tyto faktory pak mohou způsobovat v konečném hodnocení nadhodnocení, popř. podhodnocení výsledků. Na dále uvedených obrázcích jsou příklady využití analytických výsledků pro zpětnou kalkulaci spotřeby drog v roce 2013. Přepočítávací a korekční faktory použité pro výpočty byly převzaty z literárních podkladů (Postigo et al. [12]).

## Průběžné výsledky řešení projektu

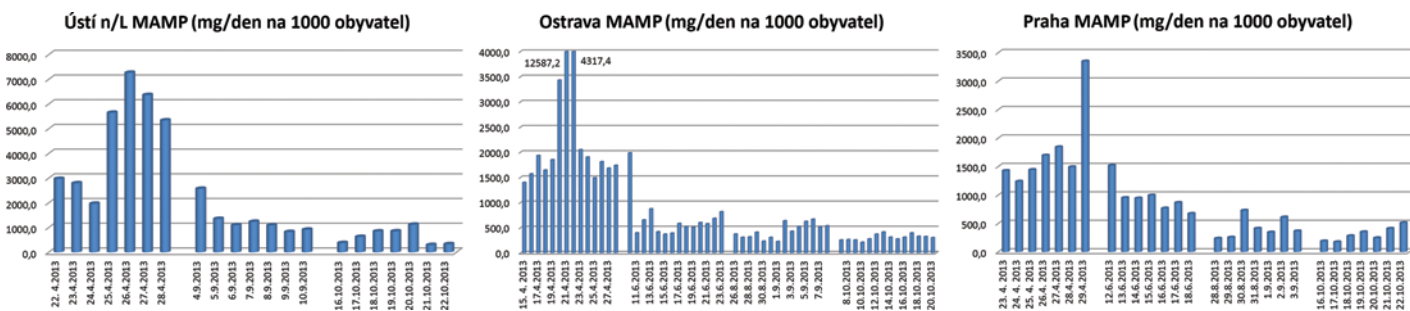
Na základě souhrnu výsledků sledování obsahu drog a jejich metabolitů v komunálních odpadních vodách v roce 2013 je možno konstatovat, že nezákonné drogy byly nalezeny ve všech analyzovaných vzorcích odpadních vod (bylo odebráno a zpracováno cca 1 000 vzorků). Koncentrace metamfetaminu v některých případech byly vyšší než 10 000 ng/l, nálezy amfetaminu se pohybovaly mezi 2 ng/l a 1 500 ng/l, MDMA – extáze byla nalezena v koncentracích v rozmezí 0,1 až 534 ng/l. Nálezy benzoyllegoninu, hlavního metabolitu kokainu, ze kterého se při výpočtech vychází, byly v intervalu 0 až 850 ng/l.

Grafy na následujících obrázcích umožňují srovnání mezi jednotlivými sledovanými aglomeracemi. Při celkovém hodnocení byly rozhodující průměrné hodnoty za sledované období.

Spotřeba metamfetaminu (pervitinu) je nejvyšší v Ústí nad Labem, následuje Ostrava a Praha (obr. 3). V Ústí nad Labem byly realizovány pouze tři odběrové kampaně s vzhledem k postižení Ústí nad Labem povodní na jaře 2013. V Ostravě byly vzorkovací kampaně čtrnáctidenní.

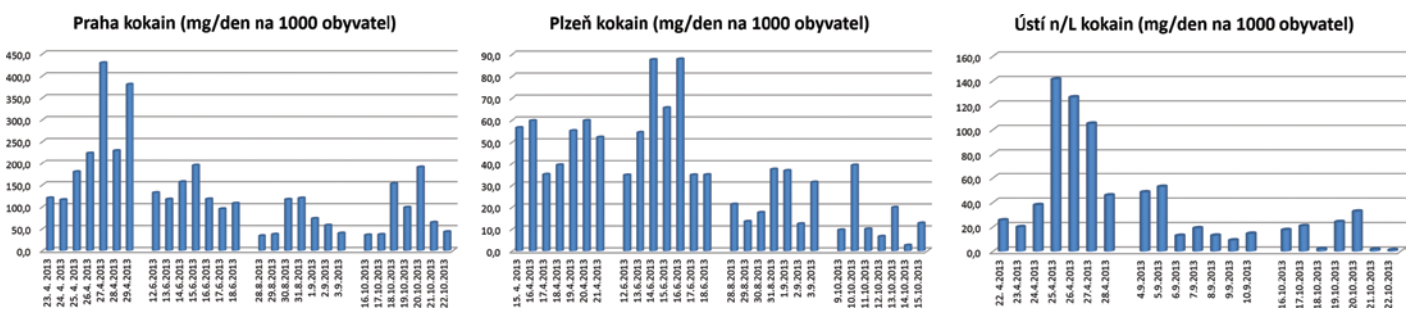
Spotřeba amfetaminu je opět nejvyšší v Ústí nad Labem, potom v Praze a Karviné. Nejvyšší spotřeba kokainu je v Praze, která je následována Plzní a Ústím nad Labem (obr. 4).

V Praze je také nejvyšší spotřeba MDMA – extáze. Dalšími městy s nejvyšší spotřebou této drogy jsou Brno a Plzeň (obr. 5). Z grafů na obr. 5 je zřejmé, že extáze je typickou víkendovou drogou. Víkendy jsou vyznačeny barevně – sobota červená, neděle zelená barva.



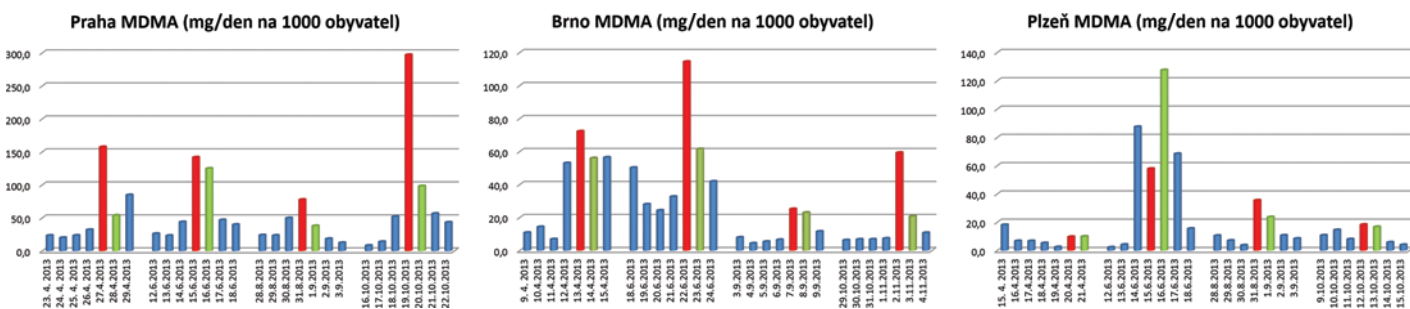
Obr. 3. Spotřeba MAMP (pervitinu) v nejzatíženějších lokalitách

Fig. 3. Consumption of MAMP (methamphetamine) in the most problematic localities



Obr. 4. Spotřeba kokainu v nejzatíženějších lokalitách

Fig. 4. Consumption of cocaine in the most problematic localities



Obr. 5. Spotřeba MDMA (extáze) v nejzatíženějších lokalitách

Fig. 5. Consumption of MDMA (ecstasy) in the most problematic localities

## Závěr

Ze získaných výsledků nechceme ještě vytvářet definitivní závěry. Projekt stále probíhá, zpracovávají se výsledky z roku 2014. Veškerá data se ověřují, především extrémní hodnoty naměřené v některých dnech, které mohou výsledky významně ovlivnit. Ve srovnání s ostatními evropskými městy tyto extrémní hodnoty, např. pro pervitin, ovlivňují i další přepočty, např. na počty dávek na 1 000 obyvatel, a jsou 6–7krát vyšší než nejvyšší zjištěné hodnoty evropských měst (Helsinky, Turku, Oslo) [4]. U ostatních sledovaných drog (extáze, amfetamin a kokain) se jejich spotřeba (z pohledu analýzy odpadních vod) v České republice pohybuje na evropském průměru nebo spíše pod ním.

Epidemiologii odpadních vod je věnována velká pozornost i v celoevropském měřítku. Za přibližně deset let existence se stala multidisciplinárním oborem, který se rozvíjí ve spolupráci s dalšími obory, jako jsou analytická chemie, fyziologie, biochemie, technologie odpadních vod, environmentální inženýrství a konvenční epidemiologie. Jako další cíle pro tento obor označilo EMCDDA (European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction) dosažení shody a harmonizace metod odběru vzorků a vytvoření kodexu správné praxe pro tuto oblast [14].

### Poděkování

Projekt „Stanovení množství nezákonných drog a jejich metabolitů v komunálních odpadních vodách – nový nástroj pro doplnění údajů o spotřebě drog v České republice“, identifikační číslo VG 20122015101, zkrácený název DRAGON, je řešen v rámci Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2010–2015 (BV II/2 – VS) a je financovaný formou dotace z rozpočtové kapitoly Ministerstva vnitra České republiky.

Projekt by nebylo možno realizovat bez spolupráce s následujícími institucemi a subjekty: Pražské vodovody a kanalizace, a.s., Vodárna Plzeň, Ostravské vodárny a kanalizace, a.s., Severočeské vodovody a kanalizace, a.s., Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., VEOLIA Voda Česká republika, a.s., Severomoravské vodovody a kanalizace, a.s., a Aqualia, gestion integral del agua, S.A.

## Literatura

- [1] Daughton, C.G. and Ternes, T.A. Pharmaceutical and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environ. Health Perspect.*, 107, suppl. 6, 1999, 907–938.
- [2] Daughton, C.G. Illicit drugs: contaminants in the environment and utility in forensic epidemiology. *Rev. Environ. Contam. Toxicology*, 210, 2001, p. 59–110.
- [3] Zuccato, E., Chiabrando, Ch., Castiglioni, S., Calamari, D., Bagnati, R., Schiarea, S., and Fanelli, R. Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, vol. 4, 2005, is. 1, p. 14–20.
- [4] Thomas, K.V. et al. Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis. *Science of the Total Environment*, vol. 432, 2012, p. 432–439. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969712008959>
- [5] Irvine, R.J., Kostakis, Ch., Felgate, P.D., Jaehne, E.J., Chen, Ch., and White, J.M. Population drug use in Australia: A wastewater analysis. *Forensic Science International*, vol. 210, 2011, 1–3, p. 69–73. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.01.037. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379073811000521>
- [6] Karolak, S., Nefau, T., Bailly, E., Solgadi, A., and Levi, Y. Estimation of illicit drugs consumption by wastewater analysis in Paris area (France). *Forensic Science International*, vol. 200, 2010, 1–3, p. 153–160. 10.1016/j.forsciint.2010.04.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379073810001799>

- [7] Nefau, T., Karolak, S., Castillo, L., Boireau, V., and Levi, Y. Presence of illicit drugs and metabolites in influents and effluents of 25 sewage water treatment plants and map of drug consumption in France. *Science of the Total Environment*, 2013, 461–462, p. 712–722.
- [8] Baker, D.R., Ocenaskova, V., Kivalova, M., and Kasprzyk-Hordern, M. Drugs of abuse in wastewater and suspended particulate matter – Further developments in sewage epidemiology. *Environment International*, vol. 48, 2012, p. 28–38.
- [9] Valcárcel, Y., Martínez, F., González-Alonso, S., Segura, Y., Catalá, M., Molina, R., Montero-Rubio, J.C., Mastroianni, N., López de Alda, M., Postigo, C., and Barceló, D. Drugs of abuse in surface and tap waters of the Tagus River basin: heterogeneous photo-Fenton process is effective in their degradation. *Environment International*, vol. 41, 2012, p. 35–43.
- [10] Hummel, D., Loeffler, D., Fink, G., and Ternes, T.A. Simultaneous determination of psychoactive drugs and their metabolites in aqueous matrices by liquid chromatography mass spectrometry. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, 2006, p. 7321–7328.
- [11] Postigo, C., Lopez de Alda, M.J., and Barceló, D. Fully automated determination in the low nanogram per Liter level of different classes of drugs of abuse in sewage water by on-line Solid-Phase Extraction-Liquid Chromatography-Electrospray-Tandem Mass Spectrometry. *Anal. Chem.*, 2008, 80, 3123–3134.
- [12] Postigo, C., Lopez de Alda, M.J., and Barceló, D. Drugs of abuse and their metabolites in the Ebro river basin: occurrence in sewage and surface water, sewage treatment plants removal efficiency, and collective drug usage estimation. *Environment. Int.*, 36, 2010, 75–84.
- [13] EMCDDA (Evropské monitorovací centrum pro drogy a drogovou závislost). *Výroční zpráva za rok 2011: Stav drogové problematiky v Evropě*. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie, 2011. ISSN 978-92-9168-466-3.

**Ing. Věra Očenášková, Ing. Danica Pospíchalová,  
Ing. Alena Svobodová,  
Mgr. Petra Kolářová, Ing. Petr Tušil, Ph.D., MBA  
VÚV TGM, v.v.i., Vera.Ocenaskova@vuv.cz**  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Selected Illicit drugs in Wastewater (Ocenaskova, V.; Pospichalova, D.; Svobodova, A.; Kolarova, P.; Tusil, P.)*

### Key words

*sewage epidemiology – illicit drugs – methamphetamine – amphetamine – MDMA – cocaine*

**The aim of the project “Determination of the amount of illicit drugs and their metabolites in municipal wastewater (DRAGON) – new tool for obtaining of complementary data on illicit drug consumption in the Czech Republic” is to obtain the new data set about use of illicit drugs. During 2013 almost 1 000 samples of raw wastewater were analyzed. Illegal drugs were found in all analyzed samples. The concentration of methamphetamine was in some cases higher than 10 000 ng/l. Findings of amphetamine ranged between 2 ng/l and 1 500 ng/l, the highest concentration of ecstasy was 535 ng/l. The concentrations of the major metabolite of cocaine, benzoylecgonine, from which the calculation on the estimation of drug consumption is based, were from 0 ng/l to 850 ng/l. The project continues, the number of monitored sites has been extended to cover the entire Czech Republic.**

**VTEI** VODOHOSPODÁŘSKÉ  
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

Water Management Technical and Economical Information

**Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství. Je uveden v Seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR.**

**Redakční rada:** RNDr. D. Baudišová, Ph.D., Ing. Š. Blažková, DrSc., Ing. P. Bouška, Ph.D., prof. Ing. A. Grünwald, CSc., doc. Ing. A. Havlík, CSc., prof. RNDr. A. Sládečková, CSc., prof. Ing. J. Zezulák, DrSc.

**Ročník 56**

**ISSN 0322-8916  
ISSN 1805-6555 (on-line)  
MK ČR 6365**

**VÚV  
TGM**

**Výzkumný ústav vodohospodářský  
T. G. Masaryka, v.v.i.  
Podbabská 30  
160 00 Praha 6  
IČO 00020711**

**Kontakt:** Mgr. S. Garciova  
tel.: 220 197 282, e-mail: garciova@vuv.cz